

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra aplikované mechaniky - 330

**Experimentální stanovení napjatosti
ve stěžni okruhové plachetnice lodní třídy
Evropa**

Experimental Analysis of the Stress State
in the Mast of a Europe Class Sailboat

Student:
Vedoucí bakalářské práce:

Jan Petzuch
Ing. Michal Šofer, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání bakalářské práce

Student:

Jan Petzuch

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Experimentální stanovení napjatosti ve stěžni
okruhové plachetnice lodní třídy Evropa
Experimental Analysis of the Stress State in the Mast
of a Europe Class Sailboat

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Na základě dostupných informací vypracujte silový rozbor stěžně u okruhové plachetnice lodní třídy Evropa.
2. Určete kritické místo na stěžni a pro zvolený režim jízdy stanovte, s využitím metody konečných prvků, napjatost v tomto místě.
3. Realizujte tenzometrická měření při reálném provozu plachetnice. Naměřená data využijte k optimalizaci MKP simulací.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] LENERT, J. Úvod do metody konečných prvků. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999. 109 s. ISBN 80-7078-686-8.
- [2] LENERT, J. Základy matematické teorie pružnosti. 1.vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1997. 94 s. ISBN 80-7078-437-7.
- [3] KOLÁŘ, V., NĚMEC, L., KANICKÝ, V.: FEM Principy a praxe metody konečných prvků, Computer Press, 1997.
- [4] Webové stránky one design lodní třídy Evropa: <http://www.europeclass.org>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Šofer, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. 5. 2018


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce, bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. 5. 2018



.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Jan Petzuch

Adresa trvalého pobytu autora práce: Böhmova 232/7 Kravaře, 747 21

Anotace:

Petzuch, J.: *Experimentální stanovení napjatosti ve stěžni okružové plachetnice lodní třídy Evropa: bakalářská práce*. Ostrava, VŠB Technická univerzita, Fakulta strojní, 2018, 63 s., 3 př., Vedoucí bakalářské práce Šofer, M.

Předmětem této bakalářské práce je popis silových účinků působících na plachetnici pro všechny známé způsoby plavby a popis vzniku těchto silových účinků. Práce se rovněž zabývá vytvořením vhodné simulace metodou konečných prvků, kde je její přesnost ověřena experimentálním měřením v laboratoři. Vytvořená simulace je pak následně použita pro určení kritického místa stěžně v reálném provozu.

Annotation:

Petzuch, J.: *Experimental Analysis of the Stress State in the Mast of a Europe Class Sailboat: Bachelor Thesis*. Ostrava, VŠB Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, 2018, 63 p., 3 en., Head of Bachelor Thesis Šofer, M.

Aim of this thesis is a description of force effects act sailboat in every points of sail and a description of the origin of these force effects. The subject of thesis is also creation of appropriate simulation in finite elements method software. The simulation is verified by its comparison with experimental strain gauge measurement. Verified simulation is used for defining place with the highest stress value.

1. Obsah

Seznam použitých znaků a symbolů	7
1. Úvod.....	9
2. Plavidla.....	10
2.1. Rozdělení plavidel	10
2.2. Části plachetnice	15
2.2.1. Trup	15
2.2.2. Takeláž	17
2.2.3. Ovládací prvky a regulace	21
2.3. Okružní jachting, lodní třída Evropa	22
3. Silový rozbor plachetnice.....	25
3.1. Hmotové účinky.....	25
3.2. Parazitní odpor obtékaného tělesa	25
3.3. Dynamická vztlaková síla	27
3.4. Plavba podle směru větru.....	29
3.4.1. Po větru.....	29
3.4.2. Plavba na boční vítr	30
3.4.3. Plavba šikmo proti větru.....	33
4. Tenzometrické měření.....	34
4.1. Odporová tenzometrie.....	34
4.2. Kalibrační měření	37
4.3. Měření a vyhodnocení testovací jízdy	45
5. Závěr	59
Poděkování:	60
Seznam použité literatury	61
Přílohy	62

Seznam použitých znaků a symbolů

a	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Zrychlení
C_1	$[-]$	Součinitel dynamického vztlaku
C_2	$[-]$	Součinitel odporu
E	$[\text{MPa}]$	Modul pružnosti v tahu
F_C	$[\text{N}]$	Výslednice sil F_{DV} a F_O
F_{CK}	$[\text{N}]$	Síla nahrazující tlak p_{CK}
F_{CL}	$[\text{N}]$	Síla nahrazující tlak p_{CL}
F_{DV}	$[\text{N}]$	Dynamická vztlaková síla
F_{HN}	$[\text{N}]$	Hnací síla
F_{LAT}	$[\text{N}]$	Laterální síla
F_O	$[\text{N}]$	Obecná odporová síla
F_{OP}	$[\text{N}]$	Odporová síla plachty
F_{OT}	$[\text{N}]$	Odporová síla trupu
F_{SV}	$[\text{N}]$	Statická vztlaková síla
g	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Konstanta tíhového zrychlení
G	$[\text{N}]$	Tíhová síla působící na plachetnici s posádkou
G_P	$[\text{N}]$	Tíhová síla působící na posádku plachetnice
l_V	$[\text{m}]$	Délka vodiče
m_{PL}	$[\text{kg}]$	Hmotnost lodi
m_{PO}	$[\text{kg}]$	Hmotnost posádky
M_K	$[\text{N}\cdot\text{m}]$	Otáčivý moment vznikající na kormidle
M_{PK}	$[\text{N}\cdot\text{m}]$	Ohybový moment vytvořený tlakem p_{CK}
M_{PL}	$[\text{N}\cdot\text{m}]$	Ohybový moment vytvořený tlakem p_{CL}
p_{CK}	$[\text{MPa}]$	Celkový zatěžující tlak – konstantní
p_{CL}	$[\text{MPa}]$	Celkový zatěžující tlak – lineární
p_X	$[\text{MPa}]$	Složka zatěžujícího tlaku v ose x stěžně
p_Y	$[\text{MPa}]$	Složka zatěžujícího tlaku v ose y stěžně
R	$[\Omega]$	Elektrický odpor
ΔR	$[-]$	Změna elektrického odporu
R_I	$[\Omega]$	Elektrický odpor tenzometru

R_{2-4}	[Ω]	Elektrický odpor rezistoru
R_e	[MPa]	Mez kluzu
r_{FC}	[mm]	Rameno síly F_C k těžišti plachetnice
r_{GP}	[mm]	Rameno síly G_P k těžišti plachetnice
s	[m]	Dráha
S	[m ²]	Plocha charakteristického průřezu obtékaného tělesa
S_V	[m ²]	Plocha průřezu vodiče
t	[s]	Čas
U_m	[V]	Měřené napětí
U_n	[V]	Napětí zdroje
v	[m·s ⁻¹]	Vzájemná rychlost mezi médii a obtékaným tělesem
V	[m ³]	Objem ponořené části plavidla
v_C	[m·s ⁻¹]	Zdánlivá rychlost větru na plující lodi
v_L	[m·s ⁻¹]	Rychlost větru vzhledem k pevnému bodu
v_V	[m·s ⁻¹]	Rychlost lodi vzhledem k pevnému bodu
x	[-]	Podélná osa loď procházející těžištěm
y	[-]	Příčná osa loď procházející těžištěm
z	[-]	Svislá osa loď procházející těžištěm
α	[°]	Úhel náběhu profilu vzhledem ke směru proudění.
β	[°]	Úhel mezi ráhnem a podélnou osu lodi x
φ	[°]	Úhel mezi osou x stěžně a silou F_{CL}
σ_{RED}	[MPa]	Redukované napětí
σ	[MPa]	Normálové napětí
ε	[-]	Poměrná deformace
μ	[-]	Poissonovo číslo
ρ	[kg·m ⁻³]	Měrná hmotnost média
ρ_V	$\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}$	Konstanta měrného odporu

1. Úvod

Předmětem této bakalářské práce je srovnání simulace metody konečných prvků a experimentálního tenzometrického měření provedené na stěžni plachetnice. Kdy při známých zatíženích u experimentálního měření laboratorních podmínkách vytvoříme MKP model. Ten je následně použit při analýze tenzometrického měření za běžného provozu plachetnice. Při znalosti silového zatížení na stěžni pak lze dopočítat ostatní veličiny k úplnému doplnění silových účinků na celou plachetnici.

2. Plavidla

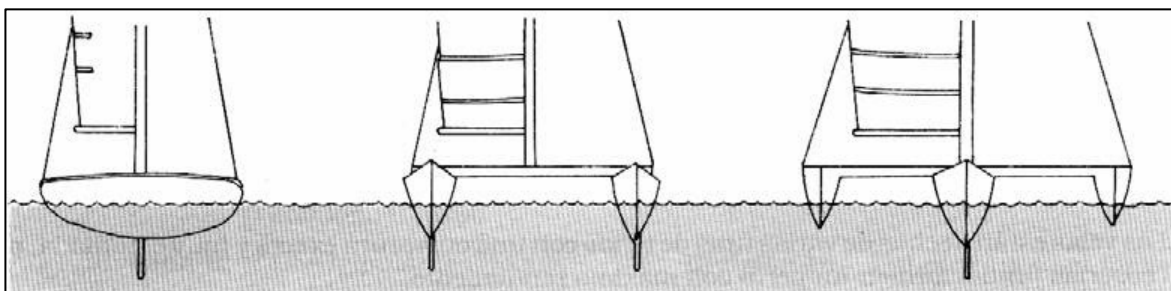
2.1. Rozdělení plavidel

Plavidla jsou rozdělena dle několika kritérií z hlediska konstrukce a použitých materiálů. Hlavní rozdělení souvisí se způsobem, jak jsou je plavidla poháněna, takto dělíme plavidla:

1. plachetnice,
2. motorové jachty.

Dle počtu trupů:

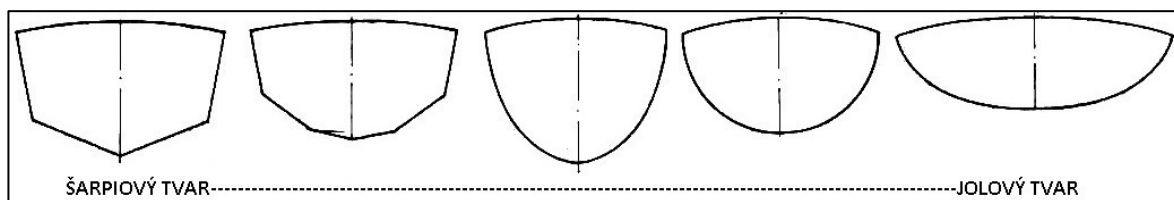
1. jednotrupá plavidla,
2. dvoutrupá – katamarány,
3. třítupá – trimarány.



Obrázek 2-1: Typy lodí podle počtu trupů, zleva: jednotrupá loď, katamaran a trimaran.

Dle tvaru příčného průřezu:

1. hranatý tvar – šarpiový typ,
2. oblý tvar – jolový typ.



Obrázek 2-2: Tvary příčného průřezu

Dle konstrukčního řešení kýlové části:

1. ploutvové,
2. kýlové,
3. ploutvo-kýlové.

Dle použitého materiálu:

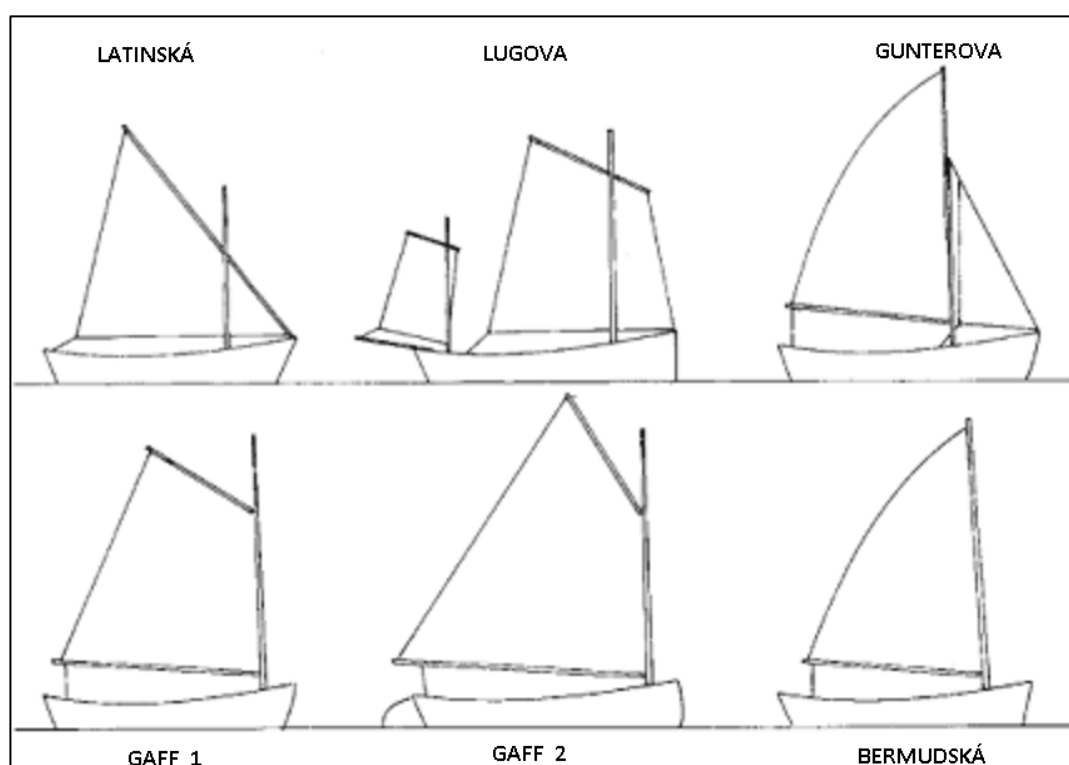
1. dřevo a lepenka,
2. kovy,
3. ferocement,
4. plast,
5. kompozitní materiály.

Dle posádky:

1. jednočlenná posádka – kormidelník,
2. dvoučlenná posádka – kormidelník, kosatník,
3. vícečlenná posádka.

Dle typu hlavní plachty

1. Latinská – bezanová,
2. Lugova,
3. Gunterova,
4. Gaff,
5. Bermudská.



Obrázek 2-3: Typy plachet

Dle počtu a umístění stěžňů:

1. Slup/Šalupa – Jeden stěžněň, který je spojen s přídělí plachtou trojúhelníkového tvaru – kosátkou a dále trojcípou eventuálně čtyřúhelníkovou hlavní plachtou; lze použít i se spinakrem. Používá se na menších námořních plachetnicích do cca 10 m, má výborné vlastnosti při plavbě ostře proti větru.



Obrázek 2-4: Slup

AUTOR NEUVEDEN. www.sailboat-cruising.com [online]. [cit. 17.5.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.sailboat-cruising.com/images/tartan40sloop.jpg>

2. Kutr – Podobný Slupu/Šalupě, rozdíl je v umístění stěžně, který je posunut více dozadu. Při použití prodlouženého čelenu se dají použít i dvě kosatky.
3. Kat – Používá se na malých obvykle sportovních lodích. Jedná se o jeden stěžněň osazený bermudským nebo gafflovým oplachtěním.



Obrázek 2-5: Kat

AUTOR NEUVEDEN. *i.pinimg.com* [online]. [cit. 17.5.2018]. Dostupný na WWW:

<https://i.pinimg.com/originals/6d/5f/ec/6d5fec535e79742015d1841ac5f5b96e.jpg>

4. Yawl – Má dva stěžně, jeden hlavní a jeden pomocný – bezanový, ten je o poznání menší, než stěžně hlavní a je umístěn co nejvíce vzadu. Umožňuje dobrou manévrovatelnost při zhoršených podmínkách.



Obrázek 2-6: Yawl

AUTOR NEUVEDEN. <http://www.sandemanyachtcompany.co.uk> [online]. [cit.

17.5.2018]. Dostupný na WWW:

http://www.sandemanyachtcompany.co.uk/images/boats/0x0_307_121056658459c3c7671404f.jpg

5. Ketch – Stejná konfigurace jako u Yawlu, ale bezanový stěžeň je umístěn více vpředu, plachta na bezanovém stěžni je ve srovnání s Yawlem výrazně větší.
6. Škuner – Dvoustěžňová (vícestěžňová) plachetnice, která se vyznačuje tím, že zadní stěžeň je větší než přední. Tato konfigurace oplachtění je nepraktická, používá se výhradně na dobových plachetnicích.



Obrázek 2-7: Škuner

AUTOR NEUVEDEN. *cdn.britannica.com* [online]. [cit. 17.5.2018]. Dostupný na
WWW: <https://cdn.britannica.com/700x450/27/123127-004-947FF48A.jpg>

2.2. Části plachetnice

Plachtění je vynález známý už od starověku. V dřívějších dobách sloužily plachetnice pro přepravu lidí, zvířat a zboží. Po vynálezu parních a spalovacích motorů se plachtění přesunulo do oblasti sportu a trávení volného času; tomu potom odpovídá jejich velikost a použité materiály. Součásti plachetnice můžeme rozdělit do tří částí: trup, takeláž (oplachtění) a řídicí prvky.

2.2.1. Trup

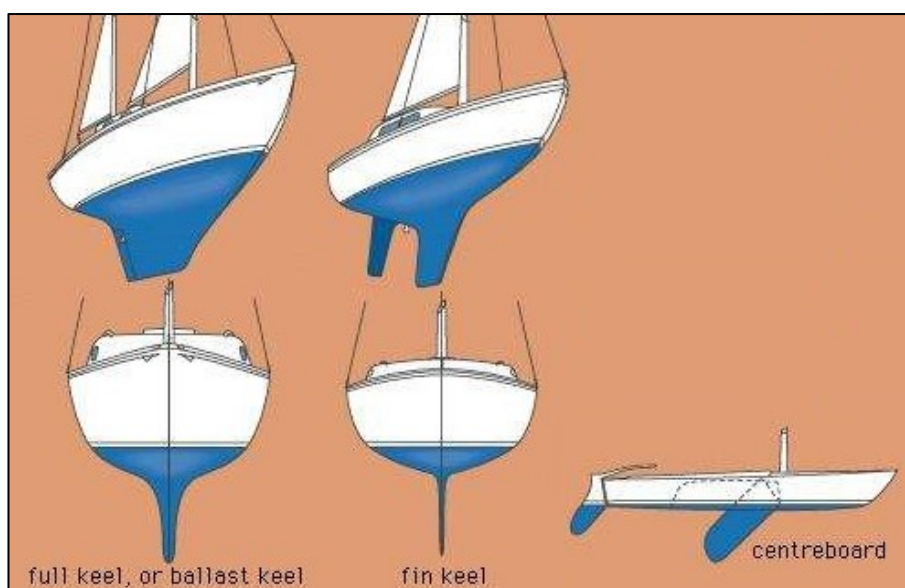
Hlavní částí lodi je trup – ten slouží ke generování vztlakové síly, tj. aby plachetnice byla schopna nést posádku s výstrojí a zároveň se nepotopila. Vztlaková síla působící na plavidlo je popsána Archimédovým zákonem. Trup je stavební základ celé plachetnice, nese ostatní části – takeláž a řídicí prvky. Trup má dno, palubu/y, dále obsahuje vodotěsné vztlakové komory, které zajišťují to, aby se loď nepotopila ani při převrhnutí a naplnění kokpitu vodou. V případě jednotrupých plachetnic se posádka zdržuje v kokpitu lodi, který je ukončen zrcadlem – zadní stěna trupu. U katamaránů a trimaránů se posádka pohybuje na natažené síti a po konstrukci spojující jednotlivé trupy; závodní plachetnice s více trupy obvykle nemá kokpit, ani kabinu.

Jako materiál pro výrobu trupu lze použít různé druhy materiálů. V počátcích bylo používáno hlavně dřevo a lepenka, které se dnes používají výhradně pro dobová plavidla. S rozvojem průmyslu se začaly používat stále dostupnější kovové materiály, např. ocel, a hliníkové slitiny. Velmi nadějným materiálem se jevil ferocement – speciální beton vyztužený ocelovým armováním; ten se používal zejména pro plavidla větších rozměrů. Tento materiál však byl zcela vytlačen úspěšnějším plastem, který má dobré mechanické vlastnosti, vysokou korozivzdornost, jeho výroba je jednoduchá a cenově dostupná. V současnosti je pro výrobu nových lodí z 90 % použito kompozitních materiálů. Kompozitní materiály kombinují požadované vlastnosti více materiálů. Při zachování podobných pevnostních vlastností jako u ocelových materiálů však dramaticky klesá hmotnost použitých dílů. Mezi nejznámější kompozity patří skelný laminát a kompozity na bázi uhlíkových a aramidových vláken. Z důvodu zlepšení mechanických vlastností se dnes využívá tzv. sendvičových materiálů, kde vnější vrstvy jsou vyrobeny z kvalitních kompozitních materiálů a výplň je tvořena plnidlem o nízké měrné hmotnosti. To zajišťuje vysokou pevnost a tuhost dílu.



Obrázek 2-8: Různé materiály trupu, vpravo plastový trup, vlevo dřevo – překližka.

Z hlediska úspory hmotnosti, a tím pádem i zvýšení účinnosti, je vhodnější použití vícetrupé plachetnice. Vícetrupá plachetnice je už z podstaty své konstrukce stabilnější než plachetnice jednotrupá. U jednotrupé musíme tuto absenci vynahradit přidáním kýlu anebo ploutve. V případě kýlu se jedná o část trupu; ploutev lze zařadit jak jako součást trupu, tak zároveň mezi řídicí členy plavidla, proto se o ploutvi zmíním v této kapitole. Kýl je hmota umístěná pod těžiště lodi, která napomáhá udržovat loď v horizontální poloze; z této polohy mohou loď vychylovat boční síly od větru nebo od vln. Ploutev, je nepřiliš hmotná deska hydrodynamického tvaru. Svým tvarem plní stejnou úlohu jako kýl. Lze ji zasouvat a vysouvat do vody dle potřeby hloubky a stylu plavby, kdy se při plavbě v mělčinách zasouvá do trupu kvůli možné kolizi. Při plavbě na zadní vítr se ploutev zasouvá taktéž, a to z důvodu snížení hydrodynamického odporu. Síly od větru na loď plující na zadní vítr nepůsobí takovým účinkem jako při plavbě na vítr boční, proto je v tomto módu plavby ploutev zbytečná.



Obrázek 2-9: Zprava: Kýlová, ploutvo-kýlová, ploutvová loď

AUTOR NEUVEDEN. [cdn.britannica.com](https://cdn.britannica.com/700x450/90/1890-004-52F26B90.jpg) [online]. [cit. 17.5.2018]. Dostupný na WWW: <https://cdn.britannica.com/700x450/90/1890-004-52F26B90.jpg>

2.2.2. Takeláž

Jedná se o veškeré vybavení a výstroj lodi určené k zachytávání energie větru a přeměnu na kinetickou energii lodi. Skládá se ze stěžňů, ráhen, plachet a lanoví pro ovládání oplachtění.

Nejdůležitější součástí takeláže je stěžeň, dlouhý – vertikální nosník, ke kterému jsou upevněny ráhna a plachty. Plachetnice mohou mít zpravidla několik stěžňů za sebou, přitom hlavní stěžeň bývá ukotven v trupu tak, aby bylo těžiště působení sil na plachtu co nejvíce v ose s těžištěm plachetnice; na větších plachetnicích je současně stabilizován lany – sálingy. Sálingy bývají použity taktéž pro nastavení sklonu stěžně. Stěžeň je vybaven kladkami pro vytahování a spouštění jednotlivých plachet; kontakt plachty se stěžněm je zprostředkován pomocí vodící drážky ve stěžni nebo pomocí kroužků. Na okružních plachetnicích lze na špici stěžně nalézt také vějíčky – zařízení pro určení směru větru.



Obrázek 2-10: Upevnění plachty ke stěžni. Vlevo provedení s drážkou, vpravo s vodícími kroužky.

AUTOR NEUVEDEN. [media-cdn.tripadvisor.com](https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-s/0c/ef/74/4e/sail-attached-to-main.jpg) [online]. [cit. 17.5.2018]. Dostupný na WWW: <https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-s/0c/ef/74/4e/sail-attached-to-main.jpg>

Jako materiál se používalo dřevo – stěžen se vyráběl z jednoho až tří kmenů stromu podle velikosti lodi. Ve 30. letech 19. století se začaly objevovat první hliníkové stěžně; v 90. letech se začaly používat stěžně převážně z kompozitních materiálů, které mají výborné mechanické vlastnosti a nízkou hmotnost. Díky vyšší pevnosti materiálu se také zmenšily příčné rozměry a tím se vylepšila aerodynamika plavidla.

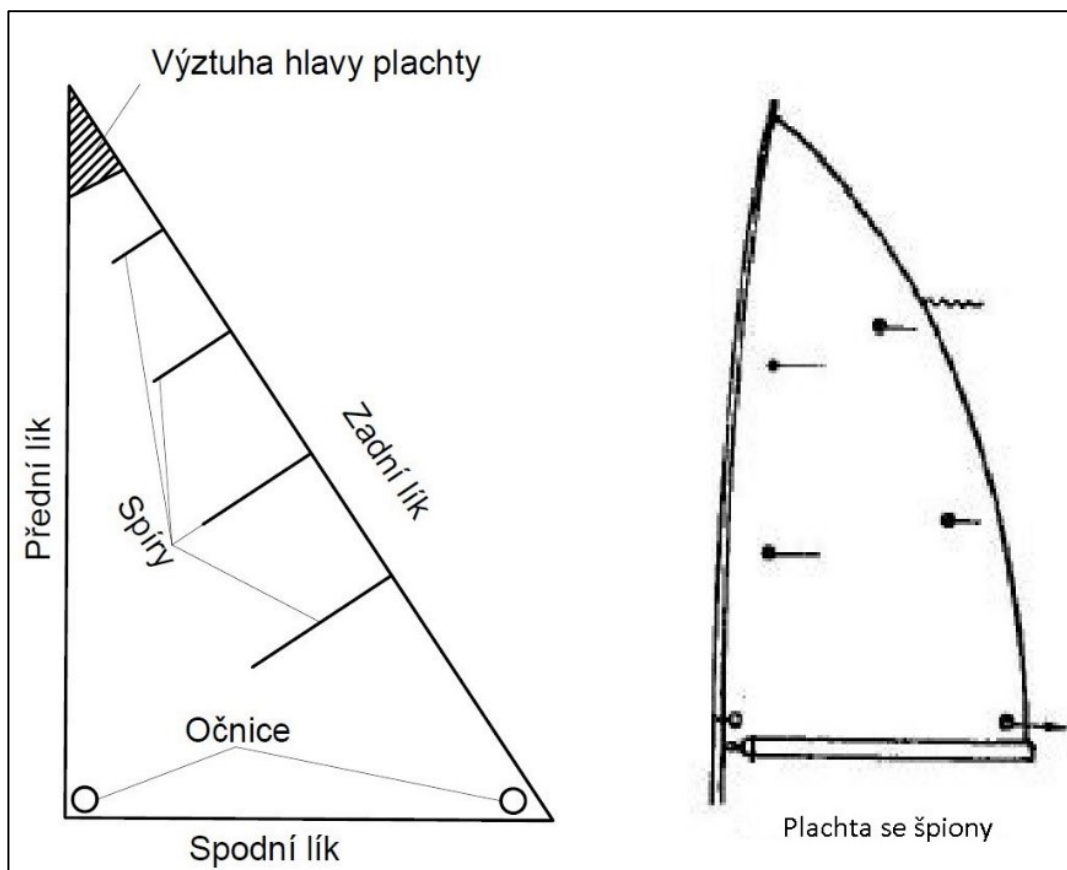
Druhou neméně důležitou částí takeláže tvoří oplachtění. Plachty lze rozdělit do dvou skupin:

- Příčné oplachtění, kde je plachta umístěna příčně na směr větru, energii z větru zachytává pouze ve směru větru, tzn. síla, kterou plachta přenáší na zbytek lodi je rovna odporové síle plachty; plavba na takové lodi je tedy závislá hlavně na počasí.

- Podélné (předozaďní oplachtění) využívá vztlakové síly, která na plachtě vzniká při vhodném proudění vzduchu kolem ní, lze s ní tedy plout i šikmo proti větru, za současného střídání směru plavby. Takový způsob plavby se nazývá křižování proti větru. Pozdější typy lodí byly vybaveny kombinací příčných a předozaďních plachet.

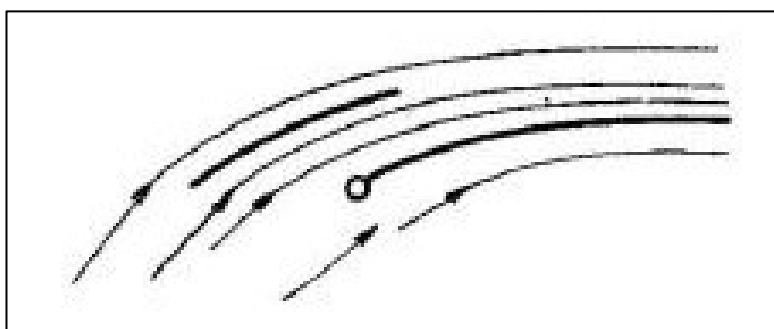
Materiál na výrobu plachet musí být pevný, dostatečně poddajný, odolný proti opotřebení překládáním, lehký a odolný proti působení chemických vlivů, jako je např. slaná voda při plavbě na moři. Dříve se jako materiál používala bavlněná a lněná vlákna, ze kterých se plachty tkaly. Tyto materiály však rychle podléhaly zkáze díky vnějším podmínkám (např. hniloba a UV záření), jejich namočením se zvýší jejich hmotnost a tím se zhorší jejich aerodynamické vlastnosti. Dnes se využívá v největší míře syntetických vláken, mezi nejpoužívanější patří nylon (dakron), aramidová a uhlíková vlákna, která jsou nejčastěji zalita v plastu, nebo hmotě na bázi pryskyřice.

U závodních plachetnic rozlišujeme tři základní druhy plachet, hlavní plachtu, kosatku a spinakr. Již z názvu lze poznat, že nejsilnějším pohonem lodi bude plachta hlavní, u závodních plachetnic jsou to plachty Bermudského typu. Mezi části hlavní plachty patří přední, zadní a spodní lík (lem), spíry, hlava plachty, vrcholová výztuha a špiony. Přední lík se dotýká stěžně a je osazen mechanismem pro vytažení plachty na stěžen, např. oka v jezdcí nebo lanka obtaženého dakronem, které je umístěno v drážce na stěžni. Zadní lík je hrana plachty, která je volná a vede od hlavy plachty ke konci ráhna. Spodní lík je uchycen k ráhnu v celé jeho délce. Spíry jsou výztuhy sloužící k udržení lepšího tvaru plachty, který produkuje více vztlakové síly. Důležité jsou špiony, krátké provázky na plachtě sloužící jachtaři jako ukazatel při trimování plachty; tj. nastavení úhlu náběhu. Při správném seřízení plachty by špiony měly být v horizontální poloze, to signalizuje plynulé obtékání plachty bez turbulencí.



Obrázek 2-11: Popis hlavní plachty

Předním líkem kosatky prochází ocelové lanko, které vede z vrcholu stěžně na čelen nebo špici lodě. Napjatost kosatky se reguluje pomocí přední očnice, úhel náběhu se pak nastavuje pomocí otěží kosatky. Hlavní přínos kosatky je zvýšení účinnosti hlavní plachty, toho dosáhneme nastavením kosatky a hlavní plachty do polohy, kdy mezi nimi vznikne štěrbina, která urychluje proud vzduchu na závětrné straně hlavní plachty. Výhodou kosatky je hladká náběžná hrana, tudíž na plachtu nepřichází zvířený proud vzduchu jako je tomu u hlavní plachty, kde turbulence způsobuje především stěžněň. Způsob spolupráce kosatky s hlavní plachtou je lépe patrný z obrázku 2-12.



Obrázek 2-122: Společná činnost kosatky a hlavní plachty [1]

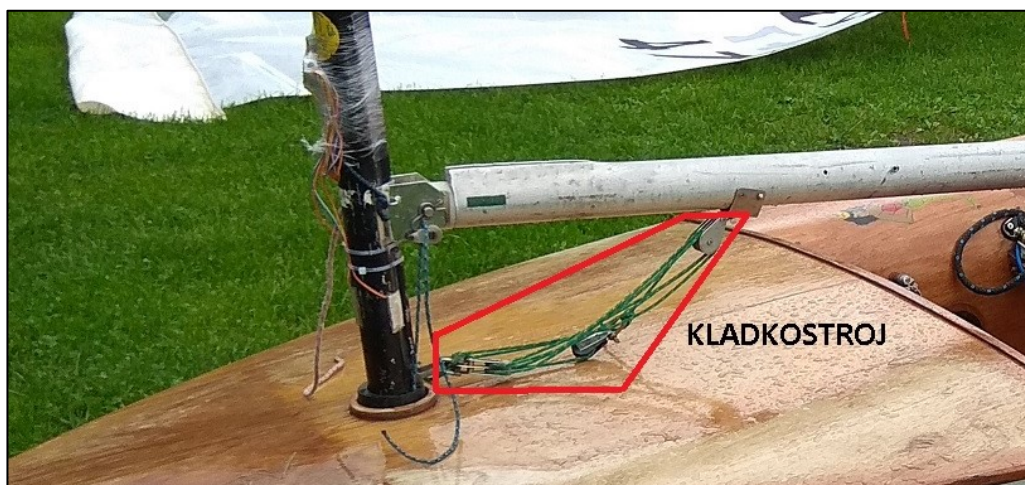


Obrázek 2-133: Lod' používající kosatku pro zvýšení účinnosti

AUTOR NEUVEDEN. *pixnio.com* [online]. [cit. 17.5.2018]. Dostupný na WWW:
<https://pixnio.com/free-images/2017/10/10/2017-10-10-10-04-02-1100x748.jpg>

Spinakr – plachta používaná při zadním a zado-bočním větru. Má kapsovitý tvar, materiál musí být velmi lehký, z důvodu častého stahování plachty při jízdě proti větru, musí materiál dobře snášet časté překládání.

Další částí takeláže je ráhno – trubka složitějšího profilu, umístěná ve spodní části kolmo na stěžň pomocí kloubového spojení, které umožňuje pohyb ráhna ve vertikálním směru; v horizontálním směru se otáčí společně se stěžněm. Poloha ve vertikálním směru je zajištěna přes kladkostroj, tzv. kiking. Jako materiál pro výrobu ráhna se nejčastěji používají lehké hliníkové slitiny [1], [2].



Obrázek 2-14 – Ukázka uchycení ráhna s kladkostrojem

2.2.3. Ovládací prvky a regulace

K ovládání směru plavby je plachetnice vybavena kormidlem. Kormidlo je složeno z listu kormidla – profilovaná deska zanořená pod vodou, ta je vložena do pouzdra (knihy), které umožňuje list v případě potřeby vysunout z vody. Kniha je připevněna k lodi pomocí závěsu. Aby se mohlo kormidlo natáčet, spoj je realizován čepem. Od knihy vede také kormidelní páka, na kterou je pomocí kloubu připojena tzv. pina – otočná páka umožňující ovládat kormidlo ze všech míst v lodi.

Úhel náběhu hlavní plachty je ovládán otěží ráhna – kladkostrojem, který má jeden konec lana ukotven pevně v lodi, druhý konec reguluje posádka lodi. Kladkostroj je obvykle vybaven zásekovou kladkou nebo svorkou proto, aby posádka nemusela držet otěže celou dobu plavby. Přitáhnutím lana zmenšujeme úhel mezi ráhnem a podélnou osou lodě. Tvar plachty se reguluje průhybem stěžně, kikingem, napětím předního a spodního líku. Kiking ovládá protažení zadního líku, je to jeden z nejdůležitějších ovládacích prvků lodi [1], [2].

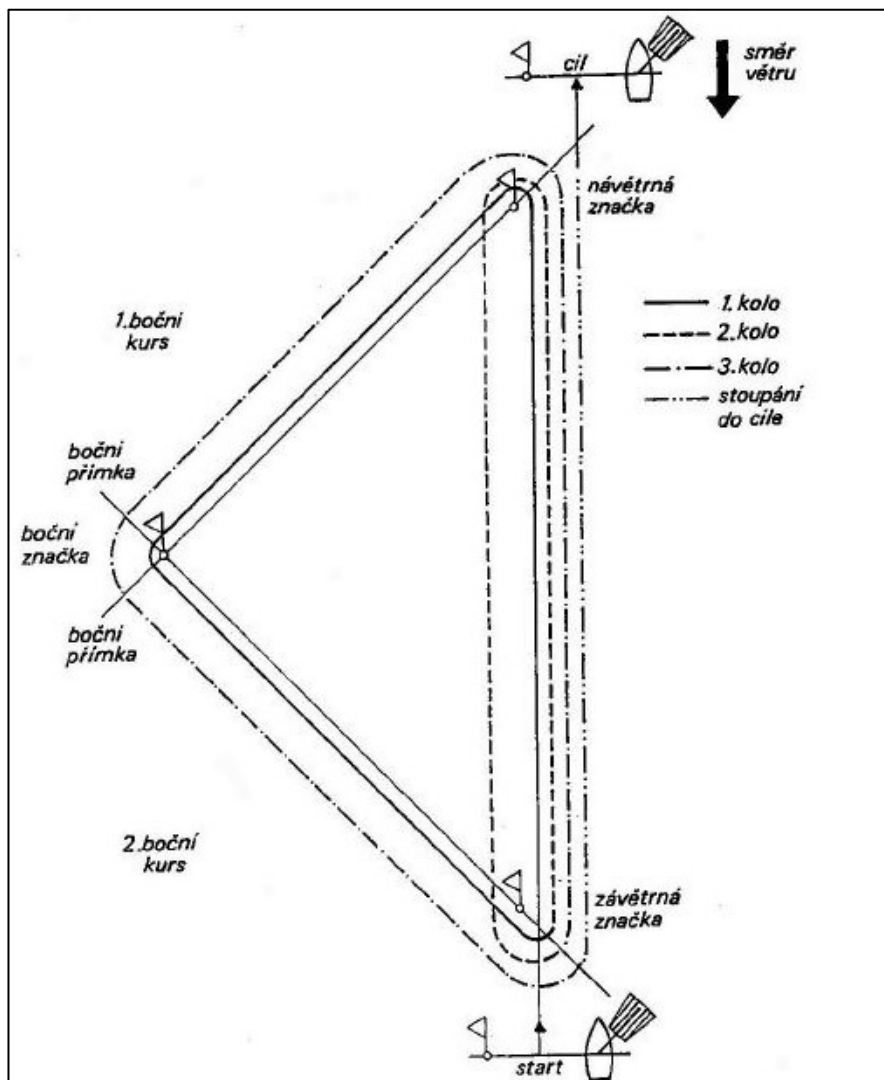


Obrázek 2-15: Popis kormidla

AUTOR NEUVEDEN. *i.pinimg.com* [online]. [cit. 18.5.2018]. Dostupný na WWW: <https://i.pinimg.com/736x/e7/99/b9/e799b9384bc7b0e7fbebfb4da90fac62--sailboats-nautical.jpg>

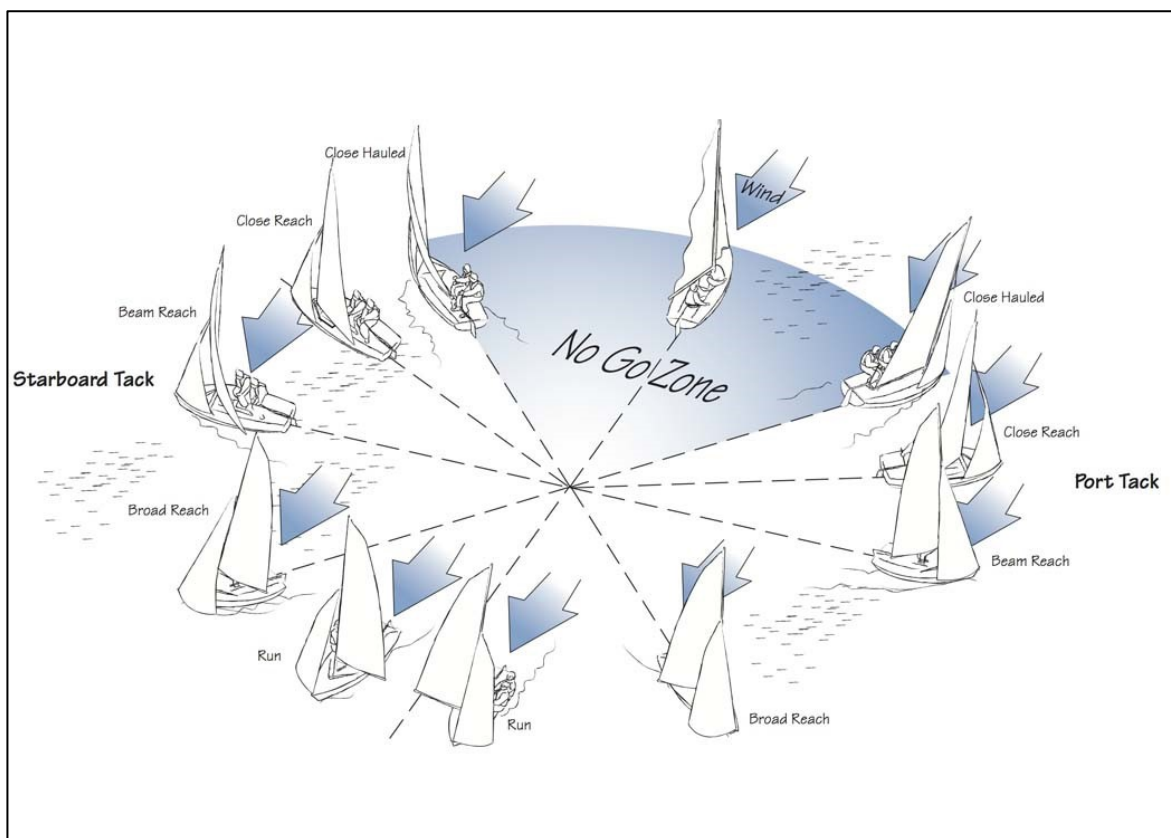
2.3. Okružní jachting, lodní třída Evropa

Závodní jachting spočívá v obeplutí trasy, která je vytyčeny bóji rychleji než ostatní závodníci. Trasa pro okružní jachting bývá nejčastěji trojúhelníkového tvaru.



Obrázek 2-16: Typická trasa závodu [1]

V takovémto závodu bude vítr vzhledem k plachetnici foukat různými směry, s tím se posádka vyrovná změnou stylu plavby – změnou kurzu, změnou nastavení plachty atd. Následující obrázek ukazuje všechny možné způsoby plavby, které budou podrobněji popsány v kapitole: Silový rozbor plachetnice. Na obrázku si lze všimnout oblasti asi $\pm 30^\circ$ od směru větru. V této oblasti nevznikají na plachtě žádné hnací síly, tzn. plavba není možná.



Obrázek 2-17 Směry plavby vzhledem ke směru větru

AUTOR NEUVEDEN. <http://www.nmma.org> [online]. [cit. 18.5.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.nmma.org/lib/img/gallery/img13319214254.jpg>

Před rokem 1870 vznikaly jachtařské kluby, které si vymýšlely v rámci regionu svá vlastní pravidla a regule pro soutěže. Z důvodu rostoucí popularity tohoto sportu se rozmohlo soutěžení klub proti jinému klubu a bylo nutné pravidla sjednotit, aby měli všichni stejné podmínky pro soutěžení. Z toho důvodu vznikla Mezinárodní jachtařská unie (IYRU), v roce 1996 přejmenovaná na Mezinárodní federaci plachtění (ISAF).

Ve 30. letech 19. vznikla v USA na Floridě drobná plachetnice s docela volnými regulemi, u níž byla předepsána pouze délka 3,35 m a maximální plocha plachty. Plachetnice byla pojmenována „MOTH“ – Můra. Tato loď se postupem času dostala také do Evropy, hlavně do Francie a Belgie. Do ČR se Můra dostala roku 1952. Její hlavní předností byla jednoduchá a levná výroba; to umožňovalo amatérskou výrobu, která byla spojena s řadou vylepšení. Aby někdo mohl vyhrávat, musel neustále držet krok s optimalizací a sám vymýšlet něco nového. V roce 1963 Francouzská federace vyhlásila soutěž o přesnou specifikaci třídy „MOTH“ z důvodu monotypizace, tj. nastavení co nejvíce podobných podmínek pro všechny závodníky. Tohoto úkolu se ujal belgický konstruktér Alois Roland, který vytvořil modifikovaný návrh z výkresových podkladů Pierra Mariquese a soutěž vyhrál. Svou novou loď pojmenoval Europe.

V roce 1976 byla lodní třída Evropa uznána na mezinárodní úrovni a v roce 1989 byla vybrána jako jednomístná lodní třída pro ženy na letní Olympijské hry konané v Barceloně roku 1992. V roce 2008 byla nahrazena lodní třídou Laser Radial.

Evropa je malá, lehká, vysoce výkonná plachetnice, vhodná především pro jachtaře s nižší hmotností. Její nízká hmotnost a rozměry ji dělají velmi dobře transportovatelnou a skladnou. U této lodní třídy je monotypovaný pouze trup, ostatní vybavení lodi např. stěžeň, kýl, směrové kormidlo, si v rámci pravidel jachtaři přizpůsobují svým tělesným parametrům, hlavně hmotnosti. Jako materiál na výrobu trupu bylo využíváno sendvičové dřevo – překližka, později plasty zesílené skelným vláknem. V současnosti vládou jako v ostatních sportovních odvětvích kompozitní materiály. [8]

Tabulka 1 [9]

Délka	3.35 m
Šířka	1,38 m
Ponor (s kýlem)	0,2 m (1 m)
Hmotnost trupu	45 kg
Hmotnost celé lodi	60 kg
Plocha plachty	7 m ²
Členové posádky	1
Déka stěžně	4,895 m

3. Silový rozbor plachetnice

3.1. Hmotové účinky

Na plachetnici působí řada sil. Jako každý objekt v gravitačním poli Země i na plachetnici působí tíhová síla G . Do velikosti tíhové síly vstupuje součet hmotností lodě – m_{PL} a její posádky – m_{PO} a dále konstanta gravitačního zrychlení g . Aby se však plachetnice nepotopila, musí zde nutně existovat reakční síla stejné velikosti a opačného směru působení; tuto sílu nazýváme statickou vztlakovou – F_{SV} . Velikost statické vztlakové síly popisuje Archimédův zákon, její velikost je přímo úměrná objemu ponořené části tělesa v kapalině – V , měrné hmotnosti média, v němž je těleso ponořené – ρ a konstantě tíhového zrychlení g .

Velikost tíhové síly:

$$G = (m_{PL} + m_{PO}) \cdot g \quad (3.1)$$

Velikost statické vztlakové síly – Archimédův zákon:

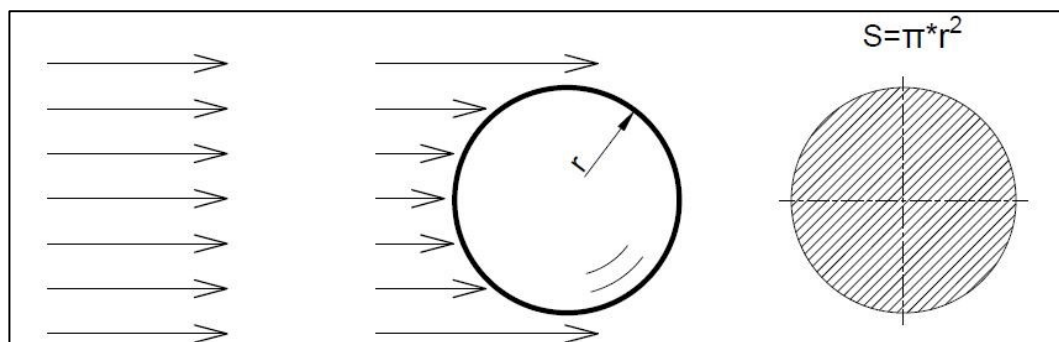
$$F_{SV} = V \cdot \rho \cdot g \quad (3.2)$$

3.2. Parazitní odpor obtékaného tělesa

Na každé těleso pohybující se vůči svému okolí; působí odporové síly působící proti pohybu tělesa. V případě plachetnice působí odporová síla způsobená obtékáním vody kolem ponořené části trupu a vzduchu kolem plachty a části trupu nad vodou. Odporová síla vždy působí proti směru pohybu tělesa v daném médiu. Obecná odporová síla F_O působící na těleso se vypočítá ze vztahu:

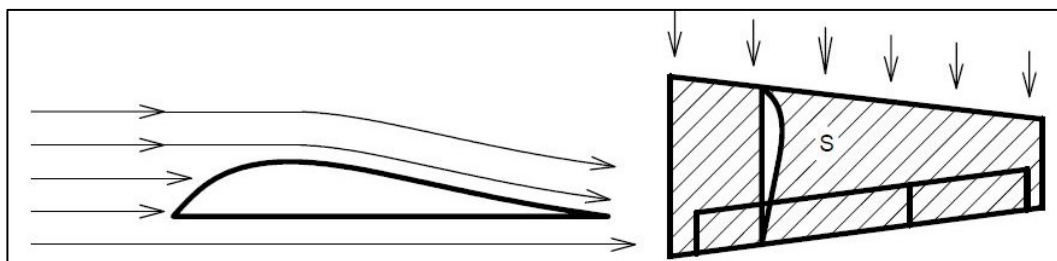
$$F_O = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_1 \quad (3.3)$$

kde ρ je hustota média proudícího okolo tělesa, v je rychlost proudění vůči obtékanému tělesu, S – charakteristická plocha a C_1 součinitel odporu. V případě, kdy žádný rozměr tělesa nepřevažuje, je charakteristickou plochou plocha příčného průřezu ve směru proudění. Například u koule bude charakteristická plocha $S = \pi \cdot r^2$, nikoliv $S = 4\pi \cdot r^2$, jak lze vidět na obrázku 3-1.



Obrázek 3-1: Charakteristická plocha koule

Pokud je podélný rozměr výrazně větší než ostatní, potom dosazujeme jako charakteristickou plochu podélnou plochu obtékaného tělesa; toto se aplikuje například na plochu křídla u letadla.



Obrázek 3-2: Charakteristická plocha křídla

Součinitel odporu tělesa se pro složité tvary určuje experimentálně, pro jednoduché tvary existuje tabulka přibližných hodnot. Součinitel ovlivňuje typ proudění (turbulentní nebo laminární) a jakost povrchu.

SHAPE	REF.	C_D	SHAPE	REF.	C_D
		0.47 ₉		—	1.17 ₉
	(c)	0.38		(a)	1.20
	(c)	0.42		(a)	1.16
	(e)	0.59 ₉		(d)	1.60 ₉
	(f)	0.80 ₉		(e)	1.55
	(d)	0.50		(a)	1.55
		1.17			1.98
	(c)	1.17		(a)	2.00
	(b)	1.42		(a)	2.30
	(a)	1.38		(b)	2.20
	(f)	1.05 ₉		(a)	2.05 ₉

AUTOR NEUVEDEN. [i.stack.imgur.com](https://i.stack.imgur.com/zL012.png) [online]. [cit. 18.5.2018]. Dostupný na WWW:

<https://i.stack.imgur.com/zL012.png>

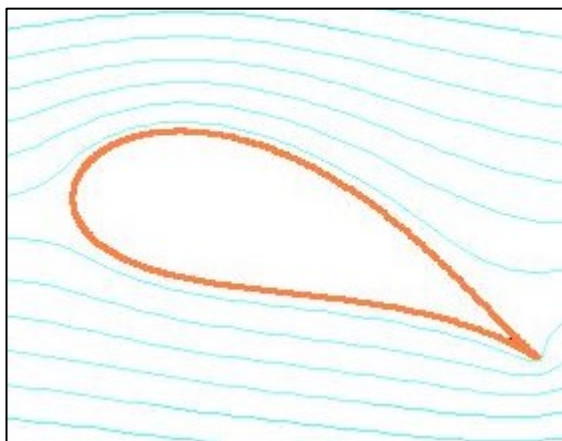
3.3. Dynamická vztlaková síla

Dynamický vztlak je popsán několika teoriemi. Mezi hlavní patří vysvětlení pomocí Bernoulliho rovnice, která využívá zákon zachování hmoty. Nad horní částí dochází ke zhušťování proudnic, to zapříčiňuje zvýšení rychlosti proudění podle Bernoulliho rovnice snížení tlaku. Pod profilem naopak dochází k řidnutí proudnic => snížení tlaku. Při známé ploše profilu se dá z difference tlaku spočítat celková vztlaková síla. Tato síla působí vždy kolmo na směr proudění média kolem tělesa. Podmínkou pro vznik dynamické vztlakové síly je buď skutečnost, že profil je nesymetrický, nebo v případě symetrického profilu nesmí být úhel náběhu α nulový. Úhel náběhu α může narůstat jen do určité meze, v případě překročení této meze přestane vztlaková síla vznikat z důvodu oddělení proudu média od horní plochy. [5], [6].

Vzorec pro výpočet dynamické vztlakové síly:

$$F_{DV} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_2 \quad (3.4)$$

kde ρ je hustota média proudícího okolo profilu, v je rychlost proudění média vzhledem k obtékanému profilu, S – charakteristická plocha a C_2 součinitel vztlaku.

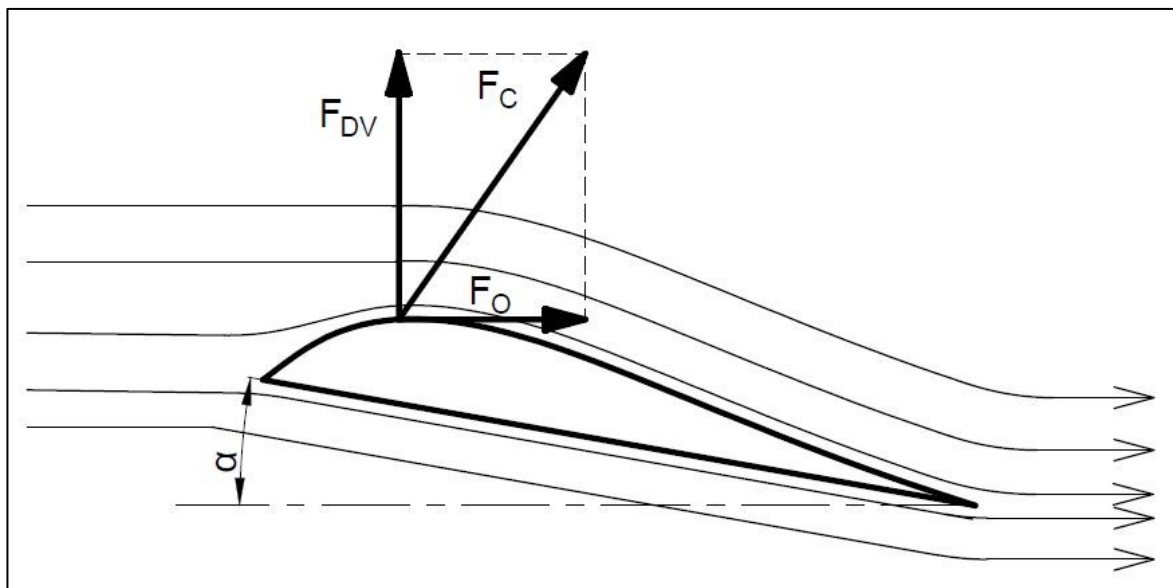


Obrázek 3-3 Proudnic okolo obtékaného profilu

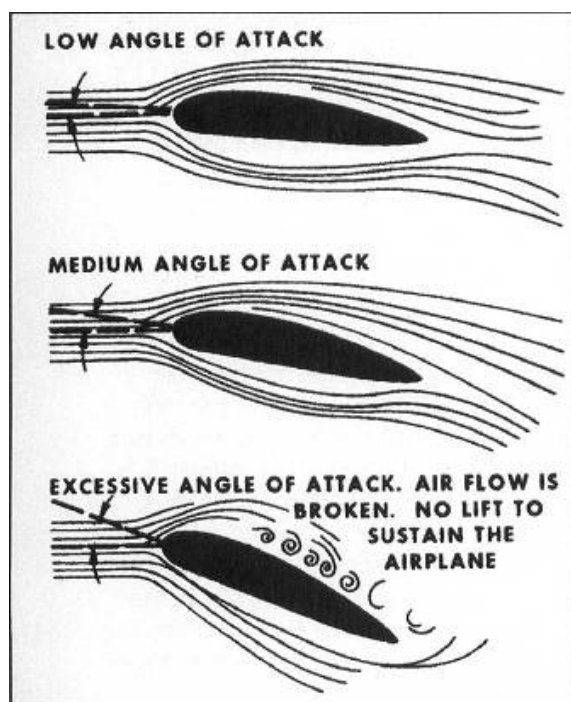
REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *fyzika.jreichl.com* [online]. [cit. 18.5.2018].

Dostupný na WWW: http://fyzika.jreichl.com/data/M_tekutiny_soubory/image123.png

Při obtékání profilu tedy vzniká jak dynamická vztlaková síla, tak síla odporová. Jejich výslednice je celková síla, která působí na profil jeho pohybem v médiu.



Obrázek 3-4: Výslednice vztlakové a odporové síly na profilu



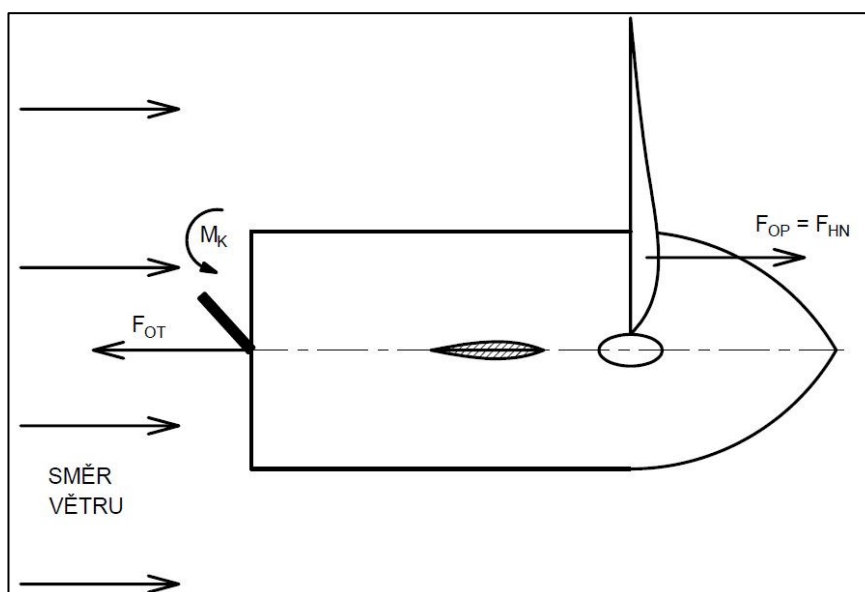
Obrázek 3-5: Shora: nízký úhel náběhu, maximální možný úhel náběhu, přehnaný úhel náběhu – ztráta vztlaku

AUTOR NEUVEDEN. [i.stack.imgur.com](https://i.stack.imgur.com/CV2Df.jpg) [online]. [cit. 18.5.2018]. Dostupný na WWW:

<https://i.stack.imgur.com/CV2Df.jpg>

3.4. Plavba podle směru větru

3.4.1. Po větru



Obrázek 3-6: Schéma působení sil a momentů při plavbě na zadní vítr.

Při plavbě na zadní vítr se plachta nastavuje tak, aby se na její ploše generovala co největší odporová síla, ideálně úhel mezi ráhnem a podélnou osou lodi – $\beta = 90^\circ$. Odporová síla na plachtě – F_{OP} vypočtená dle vztahu 3.3, se teď stává silou hnací – F_{HN} . Proti směru pohybu působí odporová síla trupu – F_{OT} a ta se spočítá ze vztahu 3.3. Působíště hnací síly je mimo osu lodi – z , což má za následek otáčivý moment, který je nutné kompenzovat kormidlem, které vytváří kompenzační otáčivý moment M_K stejné velikosti, ale opačné orientace.

Rovnice momentové rovnováhy:

$$\sum M_i = 0 \quad (3.5)$$

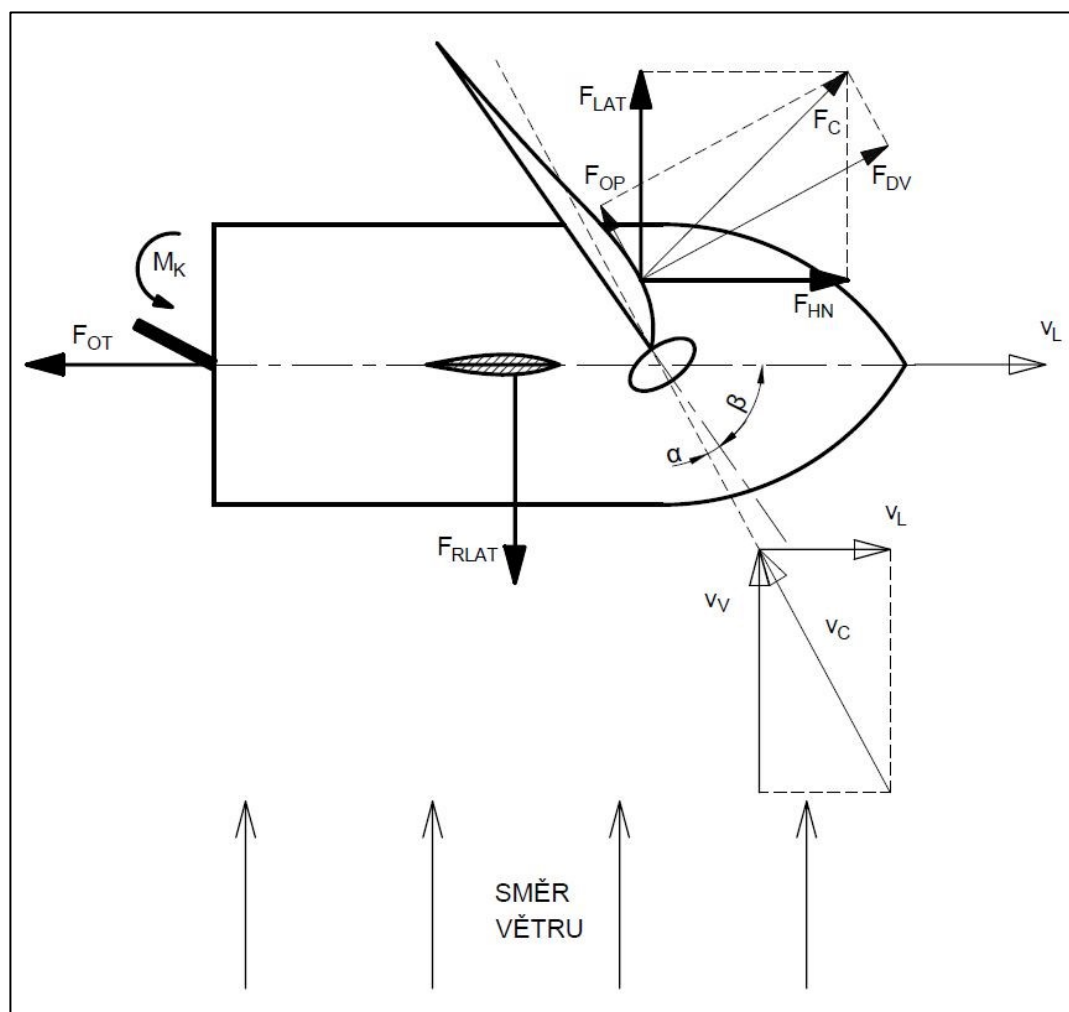
Základní pohybová rovnice:

$$\sum F_i = m \cdot a \quad (3.6)$$

Po dosazení příslušných sil:

$$F_{OP} - F_{OT} = m \cdot a \quad (3.7)$$

3.4.2. Plavba na boční vítr



Obrázek 3-7: Schéma plavby na boční vítr

Při plavbě na boční vítr plachetnice již nevyužívá odporovou sílu, nýbrž dynamickou vztlakovou sílu na plachtě F_{DV} . Dynamická vztlaková síla nabývá velikosti podle vztahu 3.4, kde jako rychlost v dosazujeme zdánlivou rychlost větru na lodi v_C . Zdánlivá rychlost je vektorový součet rychlosti absolutního větru v_V a absolutní rychlosti plachetnice v_L . Dynamická vztlaková síla působí ve směru kolmém na směr zdánlivé rychlosti v_C , při proudění vzduchu automaticky vzniká odporová síla na plachtě F_{OP} – vztah 3.3, vektorovým součtem F_{DV} a F_{OP} dostaneme celkovou sílu působící na plachtu F_C . Tato síla se prostřednictvím stěžně dále přenáší na loď. Rozkladem celkové síly získáváme: ve směru plavby (podélná osa lodě – x) hnací sílu F_{HN} , proti které působí odporová síla trupu F_{OT} , v kolmém směru (příčná osa lodě – y) laterální sílu F_{LAT} která se snaží posunout loď do skluzu stranou. Proti laterální síle působí reakční síla F_{RLAT} , která má působiště v hydrodynamickém těžišti – T_{LAT} laterální plochy, tj. ponořené části trupu včetně ploutve a kormidla. Těžištěm laterálu prochází také osa otáčení plachetnice.

Základní pohybová rovnice pro směr plavby:

$$\sum F_{ix} = m \cdot a \quad (3.8)$$

Po dosazení sil:

$$F_{HN} - F_{OT} = m \cdot a \quad (3.9)$$

Rovnice rovnováhy sil v laterálním směru:

$$\sum F_{iy} = 0 \quad (3.10)$$

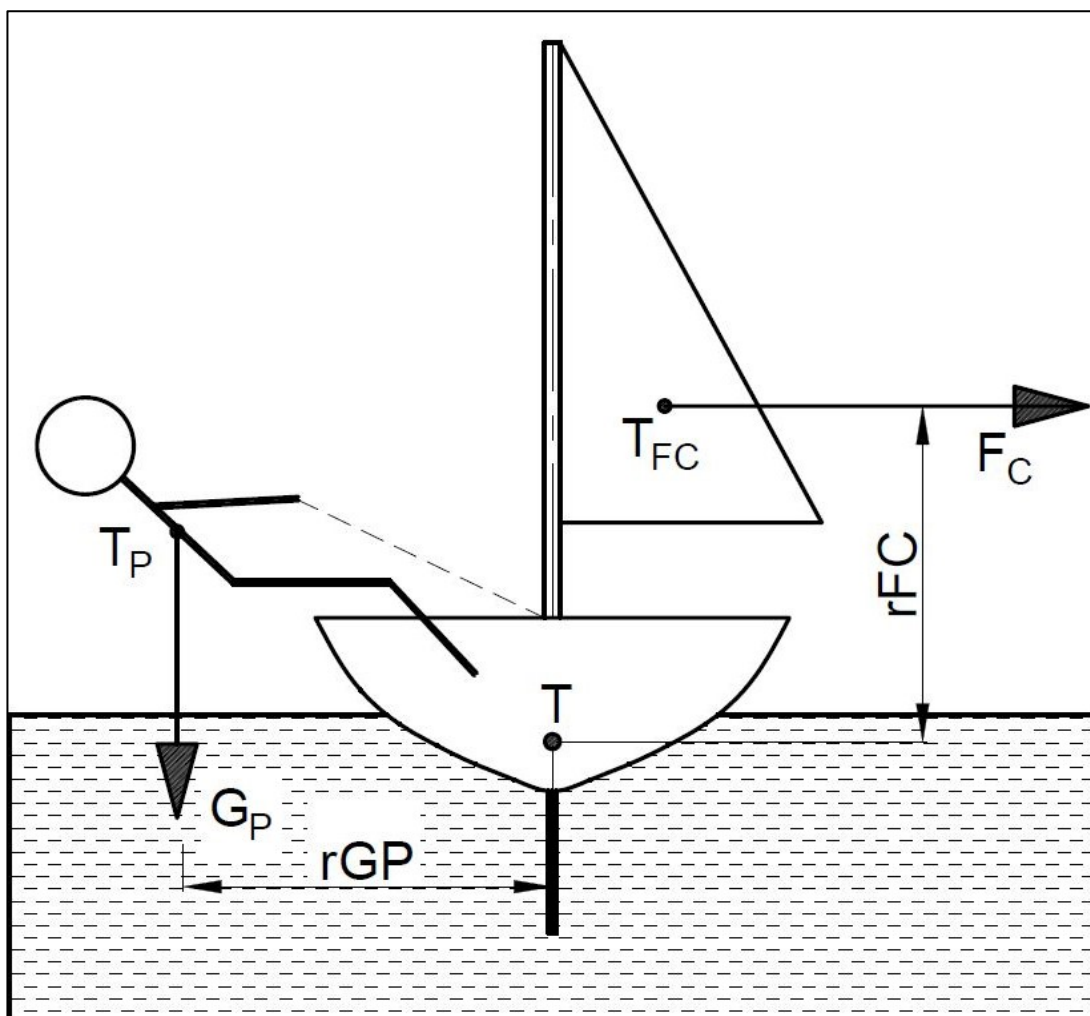
Po dosazení sil:

$$F_{LAT} - F_{RLAT} = 0 \quad (3.11)$$

Síly nepůsobí na společné ose s těžištěm laterálu. To znamená, že působí otáčivým momentem, který je opět nutné kompenzovat kormidlem.

$$\sum M_{iz} = 0 \quad (3.12)$$

Na schématu čelního pohledu níže lze vidět, že stranová složka celkové síly na plachtu F_{LAT} působí na plachetnici otáčivým momentem okolo podélné osy – x . Tento moment musí být kompenzován posádkou, resp. posádka podle svého umístění vytváří kontrující otáčivý moment. Snahou posádky je udržet ideální horizontální stav. Při náklonu lodi na jednu nebo druhou stranu vlivem špatného vyvažování loď ztrácí část využitelného proudu vzduchu [1], [2].



Obrázek 3-8: Vyvažování lodi posádkou

Rovnice momentové rovnováhy:

$$\sum M_{ix} = 0 \quad (3.13)$$

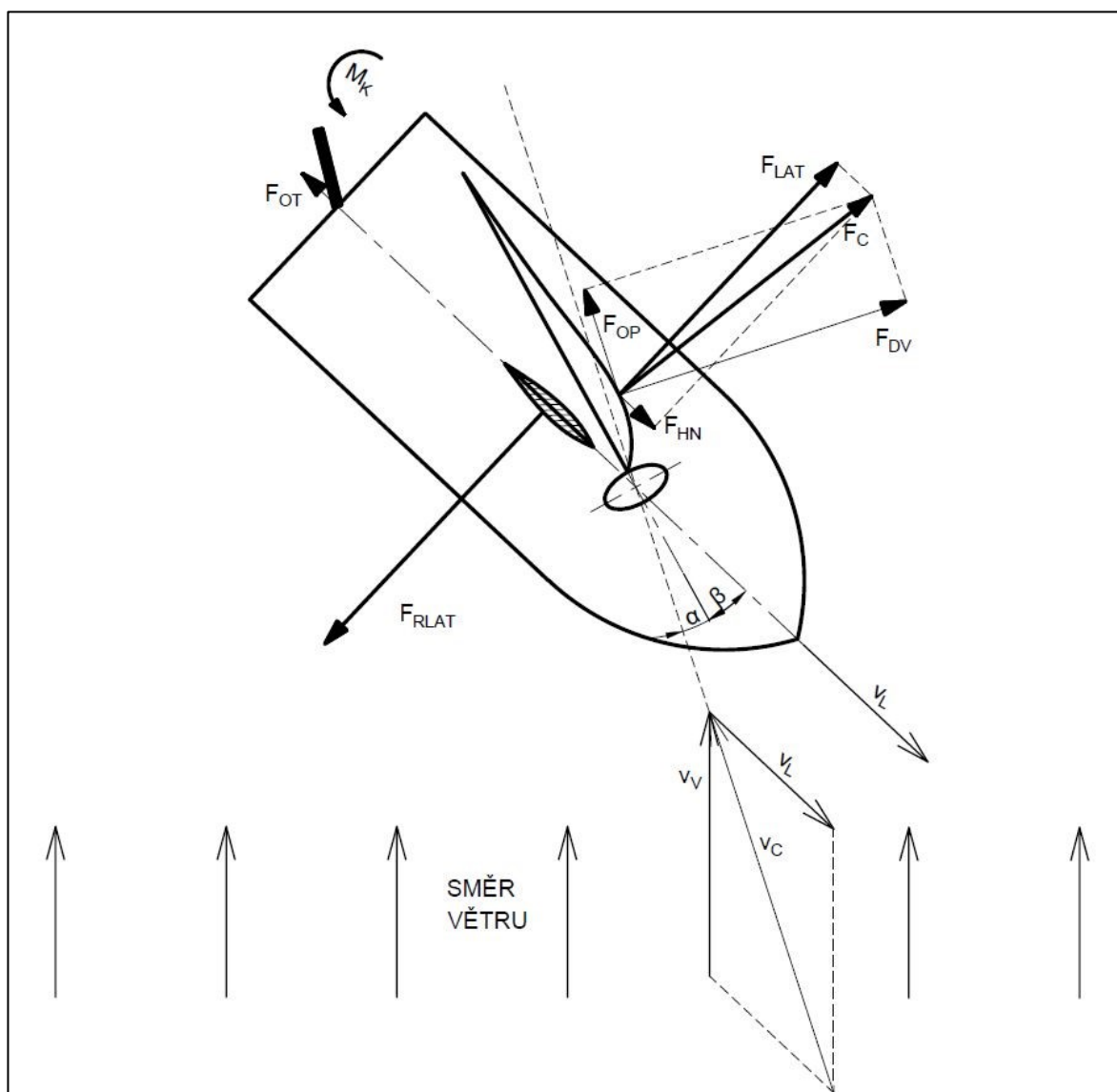
Po dosazení:

$$G_P \cdot r_{GP} - F_C \cdot r_{FC} = 0 \quad (3.14)$$

Kde G_P je tíhová síla, která působí na posádku a vypočítá se podle vztahu:

$$G_P = m_P \cdot g \quad (3.15)$$

3.4.3. Plavba šikmo proti větru



Obrázek 3-9: Schéma plavby šikmo proti větru

Pro plavbu šikmo proti větru se ráhno přitahuje téměř k podélné ose lodi. Platí stejné rozložení sil jako pro plavbu na boční vítr; rozdílné jsou pouze velikosti sil. Jak si můžeme všimnout ze schématu, při plavbě proti větru je hnací složka celkové síly F_{HN} podstatně menší než u plavby na boční vítr; naproti tomu nežádoucí laterální složka F_{LAT} je daleko větší než u plavby na boční vítr. Na toto musí posádka reagovat intenzivním vyvažováním. Plavbu šikmo proti větru je možné realizovat pouze do kritického mezního úhlu mezi směrem plavby a směrem absolutního větru. Úhel je přibližně 45° .

Zvyšování úhlu mezi ráhnem a podélnou osou lodi x je úměrné zvyšování úhlu mezi větrem a směrem plavby (podélná osa lodi x je při zanedbání skluzu totožná se směrem plavby).

4. Tenzometrické měření

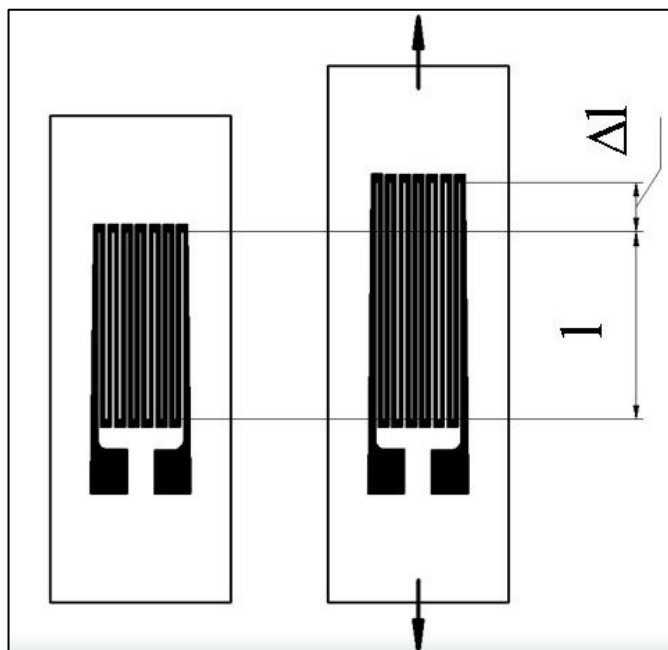
4.1. Odporová tenzometrie

Odporová tenzometrie je nedestruktivní experimentální metoda měření, bez nutnosti větších úprav konkrétního měřeného místa. Její princip spočívá ve změně měřitelného odporu tenzometru ΔR v závislosti na jeho poměrné deformaci ε . Z velikosti deformace jsme potom schopni určit velikost a typ napjatosti σ v součásti.

Odporový tenzometr je tvořen aktivní částí – odporovým drátkem o průměru 0,01 mm až 0,02 mm, který je umístěn na nosné podložce. V současnosti se používají fóliové odporové tenzometry, které se vyrábějí fotochemicky vyleptáváním mřížky z kovových fólií o tloušťce 0,003 mm až 0,005 mm. Díky příznivějšímu poměru přilepené plochy mřížky k jejímu průřezu zprostředkovává účinný odvod tepla vzniklého protékáním elektrického proudu přes odporovou část. To ve výsledku znamená, že tenzometrem může protékat vyšší proud => vyšší výstupní signál. Při deformaci tělesa se společně s ním deformuje i tenzometr a vzniká poměrné prodloužení [4].

Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (4.1)$$



Obrázek 4-1: Délka tenzometru před a po zatížení [4]

Odpor tenzometru je závislý na délce vodiče l , jeho průřezu S a měrném odporu materiálu ρ , ze kterého je odporový drát vyroben.

Odpor tenzometru:

$$R = \frac{l \cdot \rho}{S} \quad (4.2)$$

Změna odporu s deformací tenzometru:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4.3)$$

Kde se vodič prodlouží o Δl , průřez se zmenší příčnou kontrakcí o ΔS a měrný odpor se změní o $\Delta \rho$. Velikost těchto parametrů je těžce vyjádřitelná, a proto se vztah mezi poměrnou změnou odporu a poměrným prodloužením vyjadřuje vztahem:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \varepsilon \quad (4.4)$$

kde k je konstanta tenzometru. Konstanta tenzometru se určuje experimentálně, její hodnota se mění podle typu tenzometru; pro odporové tenzometry se většinou blíží $k = 2$

Při známém modulu pružnosti materiálu E , známém napětí na součásti σ , konstantě tenzometru k , odporu tenzometru R jsme schopni určit přírůstek odporu ΔR .

Vztah pro poměrné prodloužení:

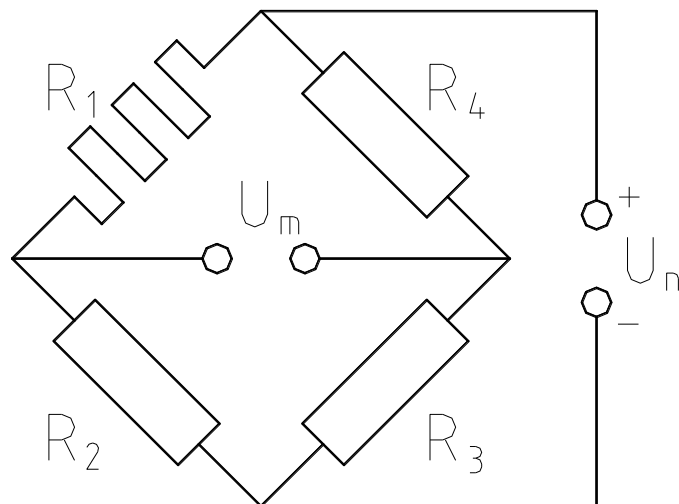
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4.5)$$

Po dosazení do společného vztahu:

$$\Delta R = R \cdot k \cdot \frac{\sigma}{E} \quad (4.6)$$

pro běžný odpor tenzometru $120 \, \Omega$ a pro použití běžného ohmmetru je tento vztah nevhodný – měřený přírůstek bude těžce měřitelný. Z tohoto důvodu se používá Wheatstonův můstek.

Wheatstonův můstek je zapojení čtyř odporů do mostu podle obrázku níže. Tenzometr lze zapojit jako samostatný místo jednoho z rezistorů, případně jsou dva odpory nahrazeny tenzometry, nebo mohou být všechny rezistory nahrazeny tenzometry.



Obrázek 4-2: Wheatstonův můstek [4]

Nejčastěji nabývají zapojené rezistory a tenzometr stejné hodnoty. Princip je následující: pokud jsou všechny odpory stejné, tak nezměříme žádný proud na úhlopříčce; v případě, že se odpor na tenzometru zvýší, tak začne proud protékat do druhé větve s menším odporem a jsme schopni tuto změnu změřit galvanometrem. [4]

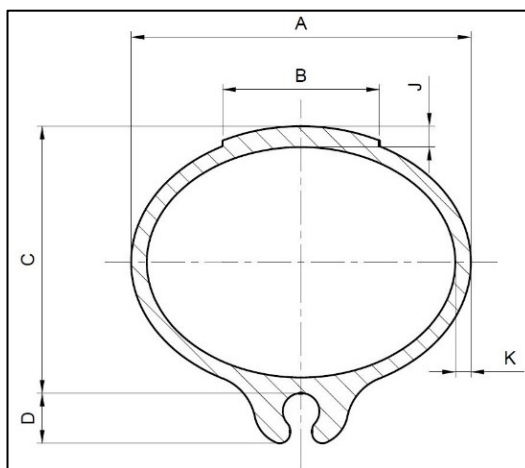
Výsledný vztah pro naměřené napětí:

$$U_m = U_n \cdot \left(\frac{R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \right) \quad (4.7)$$

4.2. Kalibrační měření

Při kalibrační části proběhlo měření v laboratořích školy, ostré měření stěžně za provozu proběhlo na přehradě Olešná.

V našem případě se jednalo o hliníkový stěžň okružní plachetnice Evropa o celkové délce 5300 mm včetně kladky umístěné na špici. Průřezy vyšetřovaného stěžně byly ve tvaru elipsy, který asi 1000 mm od špice přešel do kruhovitěho tvaru. Stěžň jsme pomyslně rozdělili na několik částí, a v každé provedli měření charakteristických rozměrů. Po změření bylo nutné vytipovat místo nejvyššího namáhání a v nejbližším vhodném místě umístit tenzometry. Před přilepením tenzometrů bylo nutné zbavit povrch ochranného nátěru a nečistot; přebroušením jsme zajistili dostatečnou rovnost povrchu pro nalepení. Na očištěný povrch jsme ve výšce 500 mm od spodu stěžně nalepili 3 tenzometry podélnou stranou ve směru délky stěžně po přibližně 120°, abychom dokázali co nejefektivněji zaznamenat vzniklou deformaci.

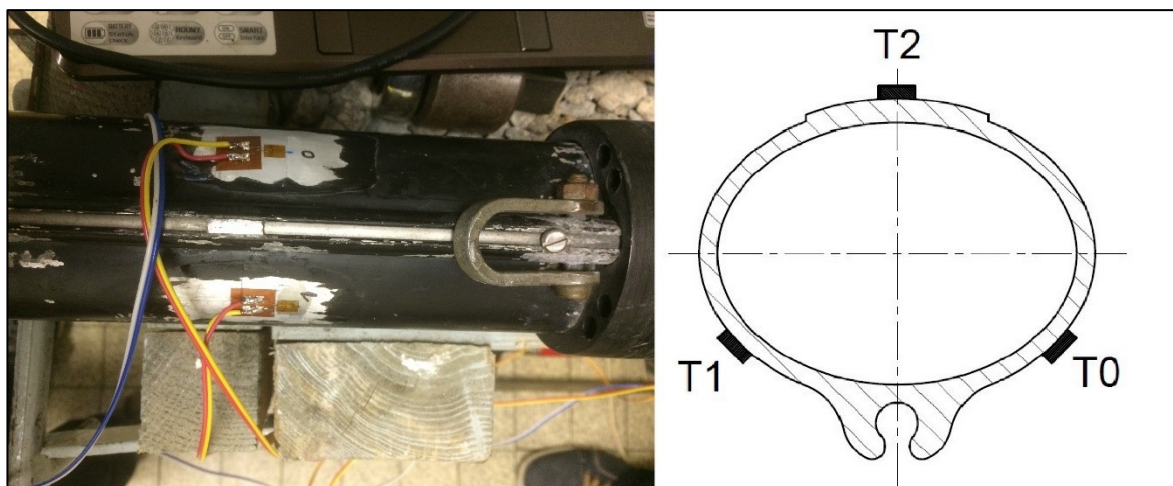


Obrázek 4-3: Charakteristický průřez stěžně

Tabulka 2

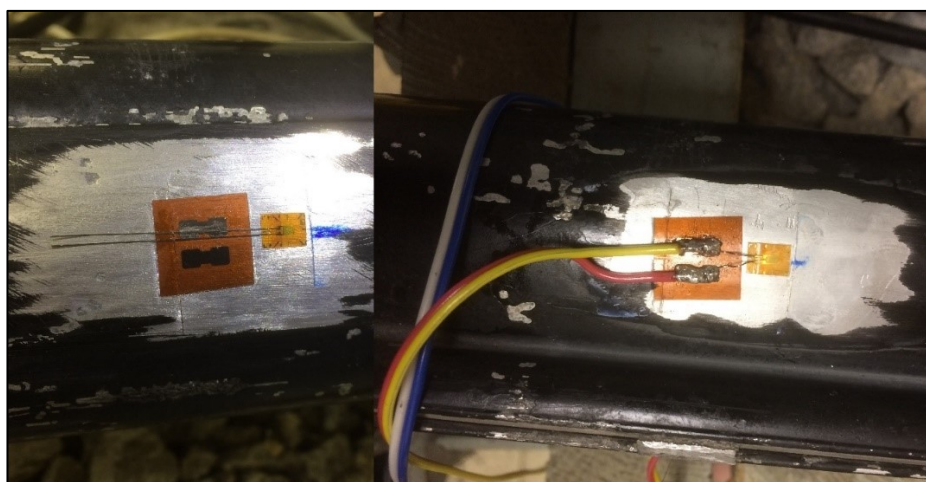
Z-ová souřadnice stěžně [mm]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	J [mm]	K [mm]
0	65	30	50	4	3	3
1850	63,5	30	50	10	3	2,92
2350	60	23	46	10	3	3
2850	53	8	43	10	2,7	2,3
3350	44	-	38	10	2,3	2,5
3850	36	-	36	10	2,2	3
4350	33	-	30	10	-	-
4650	30	-	30	10	-	-
4950	28	-	28	10	T0 [mm]	2,2
5150	28	-	28	10	T1 [mm]	2,3
5300	26	-	26	10	T2 [mm]	2,88

V tabulce jsou zaznamenány charakteristické rozměry proměnné v délce stěžně. Tloušťkové rozměry byly změřeny za použití ultrazvukové metody, v pravé dolní části tabulky jsou tloušťky stěžně naměřeny v místech tenzometrů.



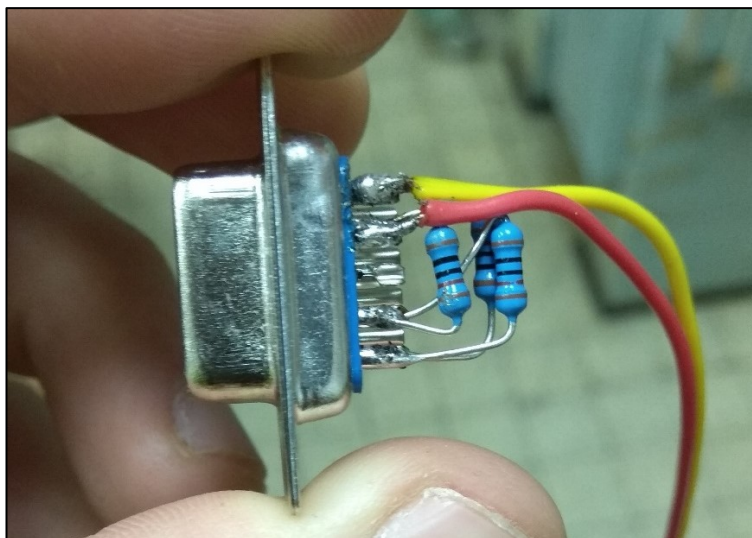
Obrázek 4-4: Vlevo rozmístění tenzometrů, vpravo půdorysný pohled na řez v místě tenzometrů

Po nalepení tenzometru speciálním dvousložkovým lepidlem jsme museli napájet vodiče tenzometru ke speciální izolační podložce z důvodu jejich choulostivosti k přetržení. K podložce jsme pak následně připájeli dráty vedoucí až do konektoru, který se připojil do zesilovače. Konkrétně u tohoto kroku se objevily první komplikace. Při kontrole izolace jsme zjistili, že tenzometr byl ve vodivém spojení se stěžněm – nebyl správně odizolován. Tento nedostatek byl odstraněn výměnou tenzometru a izolační podložky.



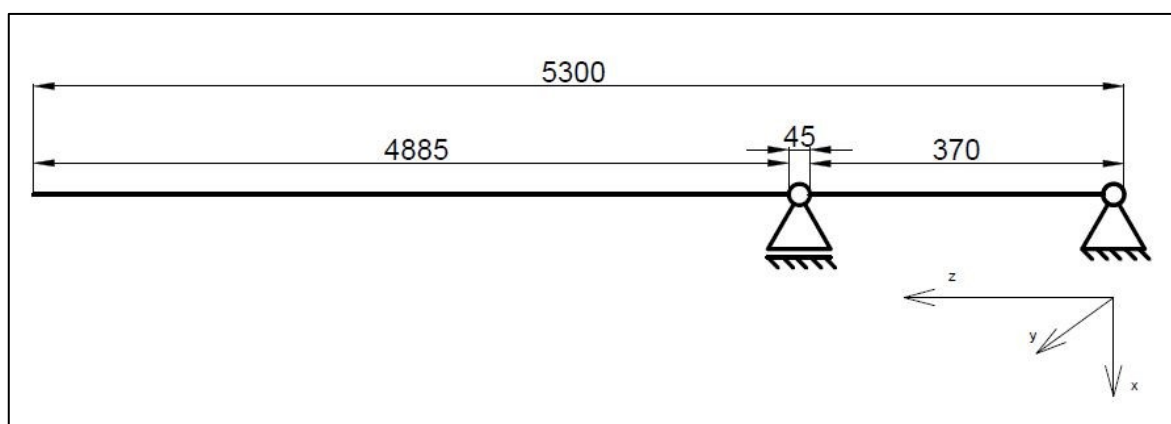
Obrázek 4-5: Spájení vodičů dohromady na izolační podložce

K vytvoření Wheatstonova můstku jsme použili konektor a tři rezistory o jmenovitém odporu $120\ \Omega$, které jsme napájeli na jednotlivé vývody konektoru společně s vodiči vedoucími od tenzometru (na obrázku 4.5 jsou to barevné dráty).



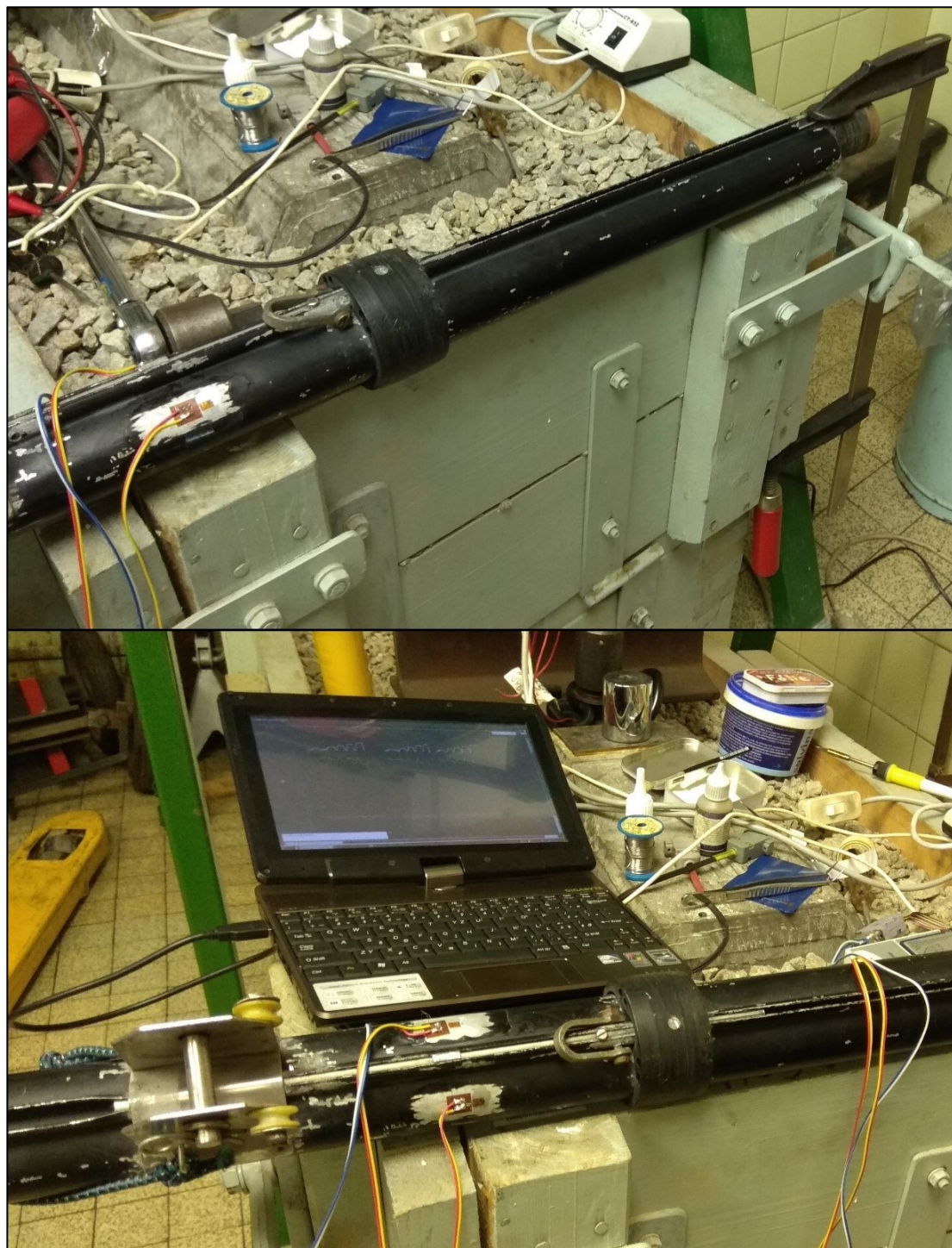
Obrázek 4-6: Realizace Wheatstonova můstku

Po proměření a ověření funkčnosti elektrického obvodu jsme mohli přistoupit ke kalibračnímu zatěžování. Stěžeň jsme upevnili k pevnému podkladu. Upevnění jsme zvolili tak, abychom co nejlépe nasimulovali upevnění v trupu plachetnice, kdy v dolní části je stěžeň nehybně uložen v trupu s možností rotace okolo své podélné osy z a možností natočení okolo os x a y . V oblasti paluby je stěžeň opatřen gumovou objímkou, která se při instalaci stěžně nasune do otvoru v palubě. Gumová objímka zajišťuje možnost natočení stěžně ve všech osách a zamezuje pohybu stěžně v rovině x - y .



Obrázek 4-7: Zjednodušené schéma upevnění stěžně při kalibraci

Stěžeň jsme tedy upevnili na konce svorkou, a objímka se opírala o pevný podklad. Kalibrace byla prováděna ve dvou polohách. V první poloze byla drážka na plachtu umístěna směrem nahoru, tzn. nejnižší polohu vzhledem k podlaze zaujal tenzometr T2. Ve druhé poloze jsme stěžeň natočili o 45° tak, aby tenzometr T0 zaujal nejvyšší postavení vzhledem k podlaze.

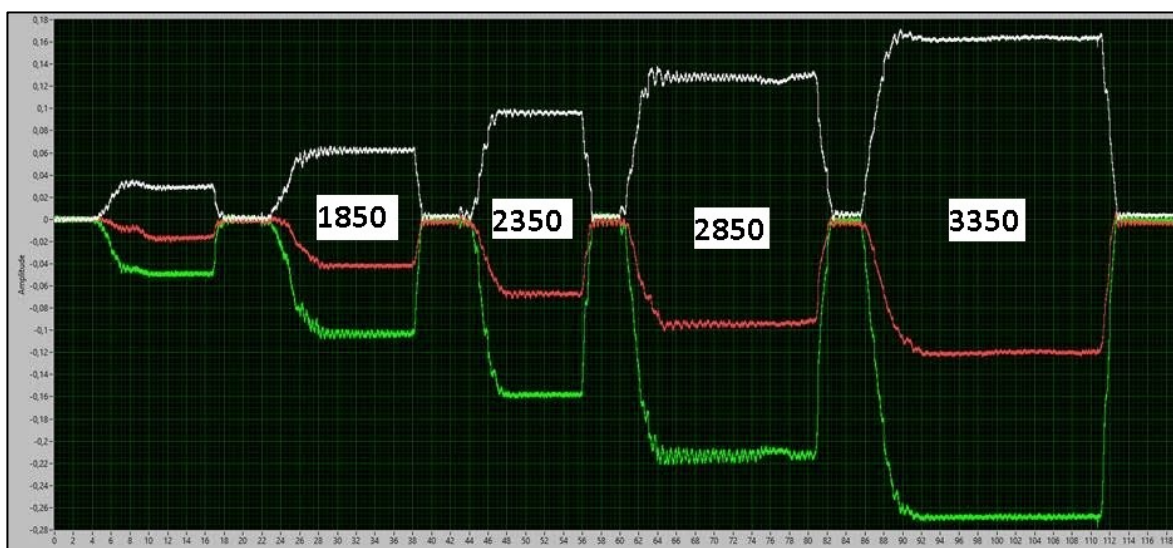


Obrázek 4-8: Realizované uchycení při kalibraci. Nahoře základní poloha, dole poloha natočená o 45°

Po uchycení jsme stěžen zatěžovali závažím v předem označených místech. Závěsný systém se skládal ze dvou závaží o celkové hmotnosti $m_z = 9,84 \text{ kg}$, z háku a provazu. Záznam elektrického napětí jsme převedli na napětí mechanické podle vztahů 4.5, 4.6 a 4.7. Grafy získané z kalibrace nám pomohly ověřit a optimalizovat FEM model.



Obrázek 4-9: Ukázka zatížení závažím v poloze 45°



Obrázek 4-10: Graf výstupů kalibrace pro polohu 45° , kde je zobrazen čas [s] na ose x a výstupní elektrické napětí na ose y

Pro vytvoření modelu stěžně jsem použil Autodesk Inventor 2016. Rozhodl jsem se, že model vytvořím pomocí ploch, u kterých následně určím konstantní tloušťku. Všechny rádiusy, drážky apod. jsem zanedbal; tuto skutečnost jsem pak kompenzoval změnou výsledné tloušťky modelu. Funkcí „šablonování“ jsem si ze známých průřezů vytvořil plochu.

Plochu jsem importoval do programu Workbench 18.2. Jako první krok jsem provedl přiřazení materiálových vlastností. Materiál stěžně jsem přesně nedokázal určit; z internetových zdrojů jsem přibližně odhadl, že se jedná o slitinu hliníku 6082 T6. Tato slitina se nejčastěji dodává ve vytvrzeném stavu – materiál je žíhán, poté kalen a na závěr za tepla vytvrzen. Mechanické pevnostní vlastnosti jsou přibližně na úrovni oceli S235. Jounkův modul pružnosti této slitiny hliníku je $E = 68,3$ MPa, poissonova konstanta je $\mu = 0,33$. Tento materiál je vhodný pro výrobu nosných konstrukcí, dopravních prostředků a pro jachty.

EN AW -	Specifikovaná tloušťka mm		Pevnost v tahu N/mm ²	0,2% mez kluzu N/mm ²	Tažnost min. %	Poloměr oblouku (zakřivení) ¹⁾	Tvrdost ¹⁾ HBS
	nad	do	min.	min.	A _{50mm}	180°	
6082 T6	≥ 0,4	1,5	310	260	6	2,5 t	94
	1,5	3,0	310	260	7	3,5 t	94
	3,0	6,0	310	260	10	4,5 t	94
	6,0	12,5	300	255	9	6,0 t	91

Obrázek 4-11: Mechanické vlastnosti materiálu 6082 T6

AUTOR NEUVEDEN. *alunet.cz* [online]. [cit. 20.5.2018]. Dostupný na WWW:

<http://www.alunet.cz/image/catalog/technicke-informace/14.png>

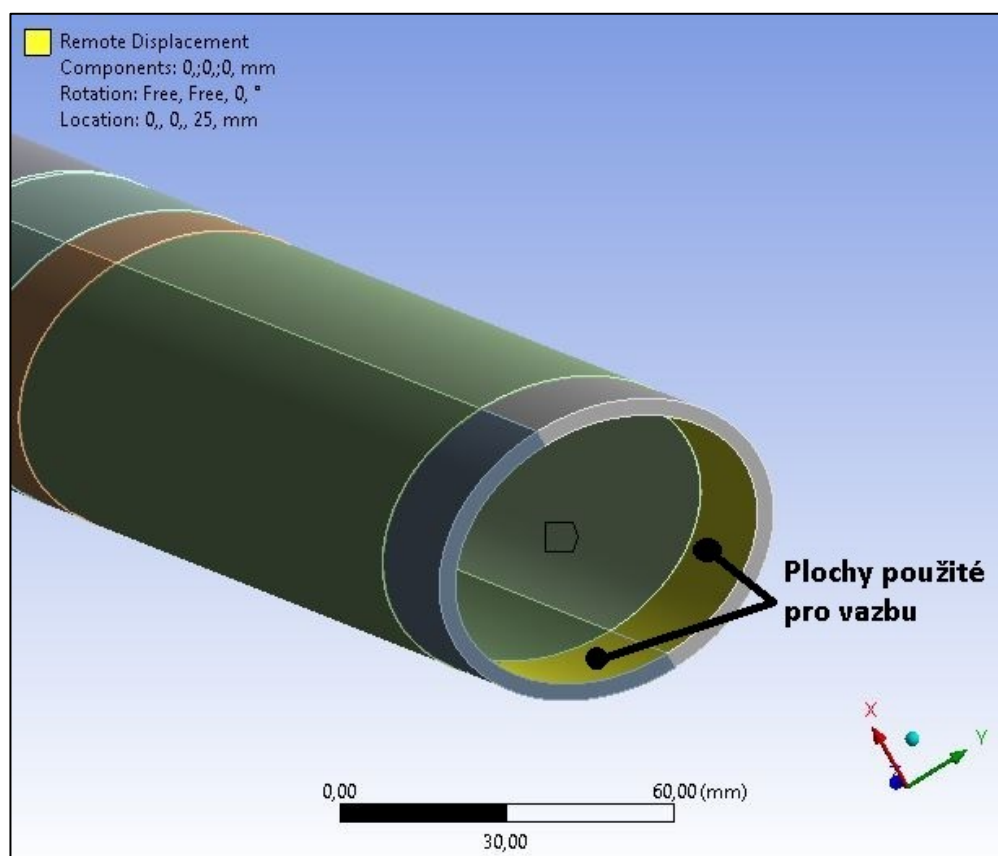
V podprogramu Design Modeler jsem celé ploše přiřadil konstantní tloušťku $t_l = 3$ mm. Na výsledném solidu jsem si vytvořil několik pomocný řezů, které jsem použil pro vytvoření nových ploch a pro rozdělení modelu na menší celky.

V podprogramu Mechanical jsem na geometrii vytvořil nejprve síť. K tomu jsem využil několikrát funkci „Sizing control“, kterou jsem si rozdělil důležité křivky daným počtem elementů. Jelikož se jedná o tvarově nesložitou geometrii, využil jsem funkci „Sweep“, kterou jsem síť vysunul v celé délce stěžně. Výhodou této funkce je použití čtyřúhelníkové sítě, která podstatně zjednoduší následný výpočet simulace.

K tvorbě okrajových podmínek jsem využil některé plochy vytvořené v předchozím kroku. Při vytváření vetknutí na spodní části stěžně jsem použil vazbu „Remote displacement“, u níž jsem zakázal pohyb ve všech směrech a zakázal otáčení okolo osy **z**; v případě, že bych nezakázal rotaci okolo osy **z** už by se nejednalo o statickou úlohu. Při vytváření vazby v místě gumové objímky jsem využil rovněž „Remote displacement“; v tomto případě jsem zakázal

všechny pohyby, ale ponechal jsem volné natočení kolem všech os. Obě dvě vazby jsem zadal jako deformovatelné.

Pro kontrolu FEM simulace jsem si vybral situaci kalibrace, kdy stěžeň byl v nenatočené poloze a závaží bylo zavěšeno ve vzdálenosti $z = 3350$ mm. V modelu jsem si proto vytvořil řez stěžně ve výšce $z = 3350$ mm a tam jsem umístil zatížení od závaží ve formě síly F_z , kterou jsem aplikoval na plochu řezu.



Obrázek 4-12: Použití vazby „Remote Displacement“ ve spodní části stěžně

Zbývající obrázky vazeb a zatížení přikládám do přílohy č. 3.

Výpočet síly způsobené zkušebním závažím:

$$F_z = m_z \cdot g = 9,84 \cdot 9,81 = 94,961 \text{ N} \quad (4.8)$$

V místě tenzometrů jsem pak pomocí nástroje „Probe“ odečetl napětí. V možnostech „Probe“ jsem zvolil normálové napětí, tj. napětí, které by ve skutečnosti měl měřit tenzometr. V tabulce 3 jsem ke každému tenzometru uvedl hodnoty naměřené při kalibraci a hodnoty získané FEM simulací.

Tabulka 3

	Kalibrace [MPa]	FEM [MPa]
T0	22÷23	22,720
T1	20÷21	22,746
T2	-(39÷41)	- 44,311

Hodnoty se lišily s maximální odchylkou do 10 %. Část těchto odchylek vznikla samotnou nepřesností tenzometrů, nepřesným ustavením při kalibraci a zjednodušením modelu. Kolega z katedry Částí a mechanismů strojů použil porovnání kalibrace přesný model a jeho výsledky byly s chybovostí cca 5 %. Jeho model byl však tvořen tetraedry, kterých bylo potřeba na vytvoření sítě daleko více a nevytvoří pravidelnou síť.

Tímto lze tvrdit, že můj zjednodušený model dostačuje na poměrně přesné určení skutečných deformací a napětí vzniklých při testovací jízdě na přehradě Olešná.

4.3. Měření a vyhodnocení testovací jízdy

Z testovací jízdy na přehradě Olešná máme k dispozici následující data:

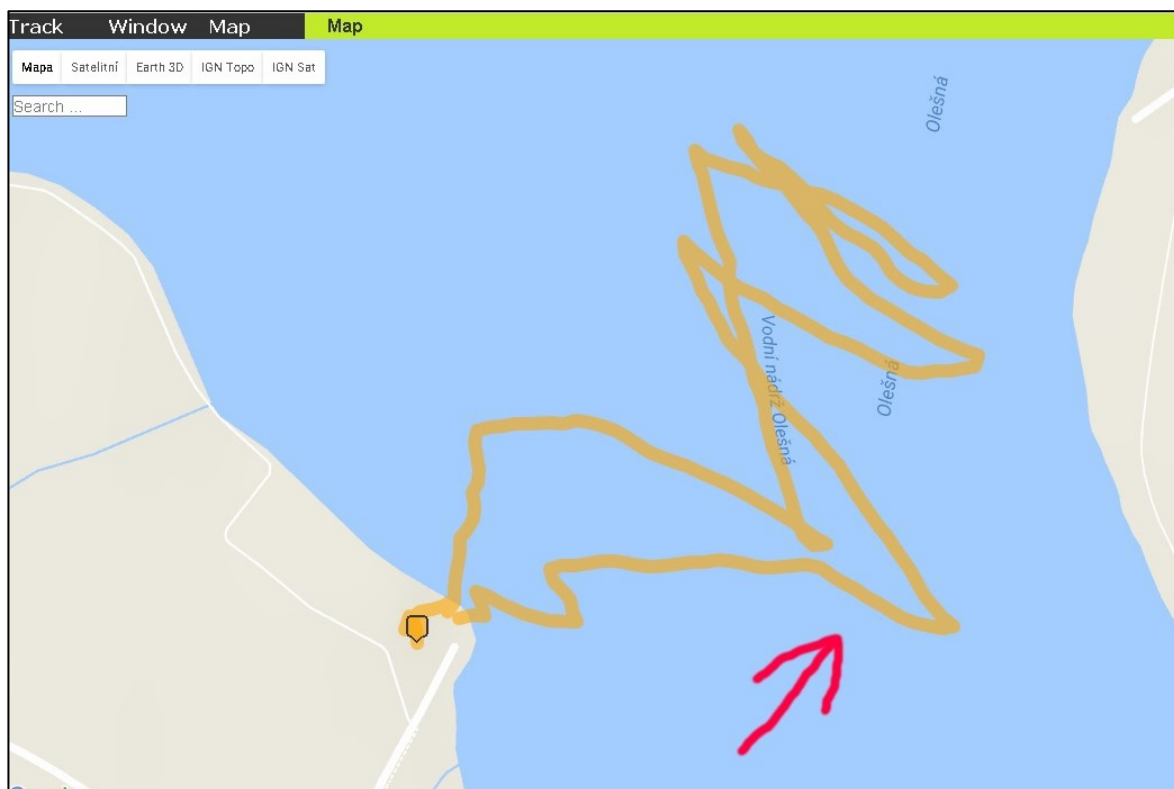
1. Rychlostní data z aplikace GPS Tracker v závislosti na čase,
2. Napětí naměřené na jednotlivých tenzometrech v závislosti na čase,
3. Přibližný směr větru,
4. Přibližné rozložení dynamického vztlaku na plachtě,
5. Charakteristický příčný průřez plachetnice,
6. Přibližný úhel mezi ráhmem a podélnou osou plachetnice $\beta = 30^\circ$

Pomocí aplikace GPS Tracker jsme byli schopni automaticky zaznamenávat data v různých časových úsecích testovací jízdy. V jednom měřicím bodě aplikace zaznamenala tyto data: absolutní čas, souřadnice a aktuální rychlost. Nevýhodou této aplikace byla nekonzistence hustoty zaznamenávání dat během měření, kdy aplikace v některých chvílích měřila cca co 5 s, v některých případech byl rozestup záznamu i více než jedna minuta. Z tohoto důvodu jsem pro výpočty musel najít místo s kvalitní hustotou záznamu a pokud možno s konstantním kurzem plachetnice.

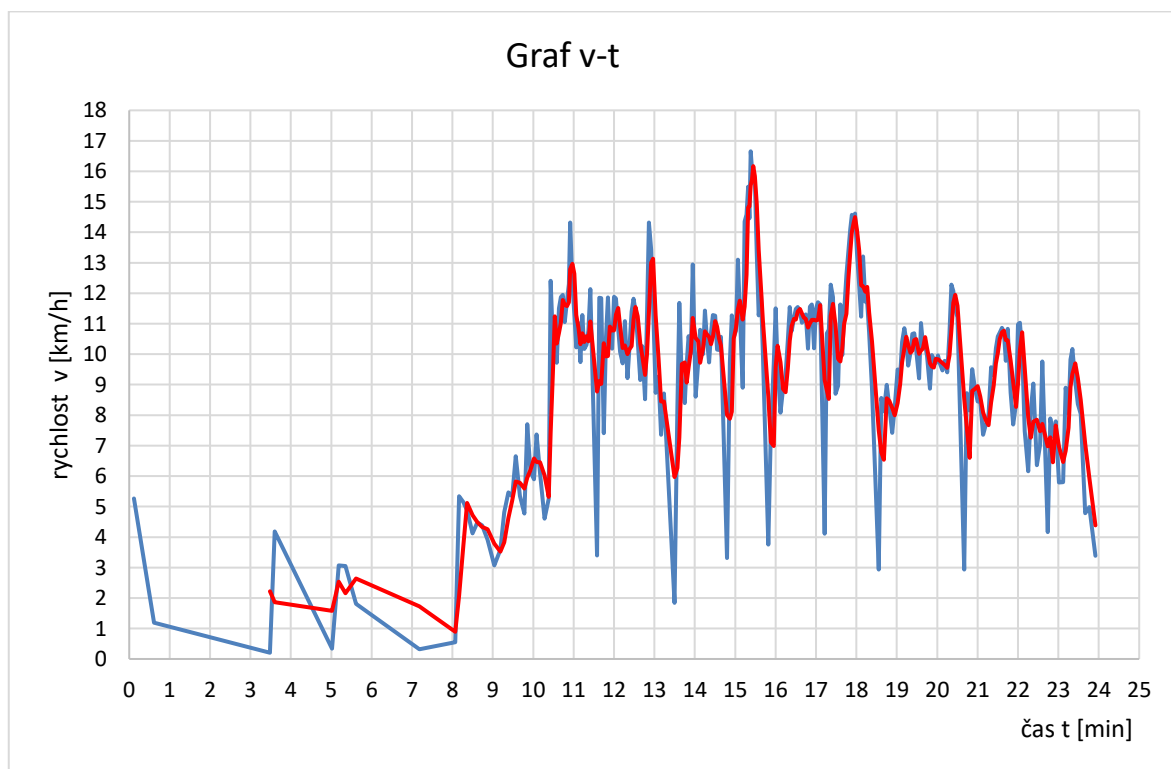
```
<trkpt lat="49.65780666666666" lon="18.311033333333334">  
  <ele>331.8</ele>  
  <time>2017-10-05T08:05:10Z</time>  
</trkpt>  
<trkpt lat="49.657898333333335" lon="18.31102">  
  <ele>331.6</ele>  
  <time>2017-10-05T08:05:17Z</time>  
</trkpt>  
<trkpt lat="49.657976666666667" lon="18.310953333333334">  
  <ele>313.2</ele>  
  <time>2017-10-05T08:05:47Z</time>  
</trkpt>  
<trkpt lat="49.6578916666666664" lon="18.310916666666667">  
  <ele>298.5</ele>  
  <time>2017-10-05T08:08:39Z</time>  
</trkpt>  
<trkpt lat="49.6579566666666664" lon="18.310968333333335">  
  <ele>303.0</ele>  
  <time>2017-10-05T08:08:46Z</time>
```

Obrázek 4-13: Ukázka zápisu dat souboru „.gpx“

Tato data jsme pomocí skriptu v Matlabu převedli tak, aby se s nimi dalo pracovat v MS Excel. Z těchto dat jsem pak vytvořil graf rychlostí v závislosti na čase.

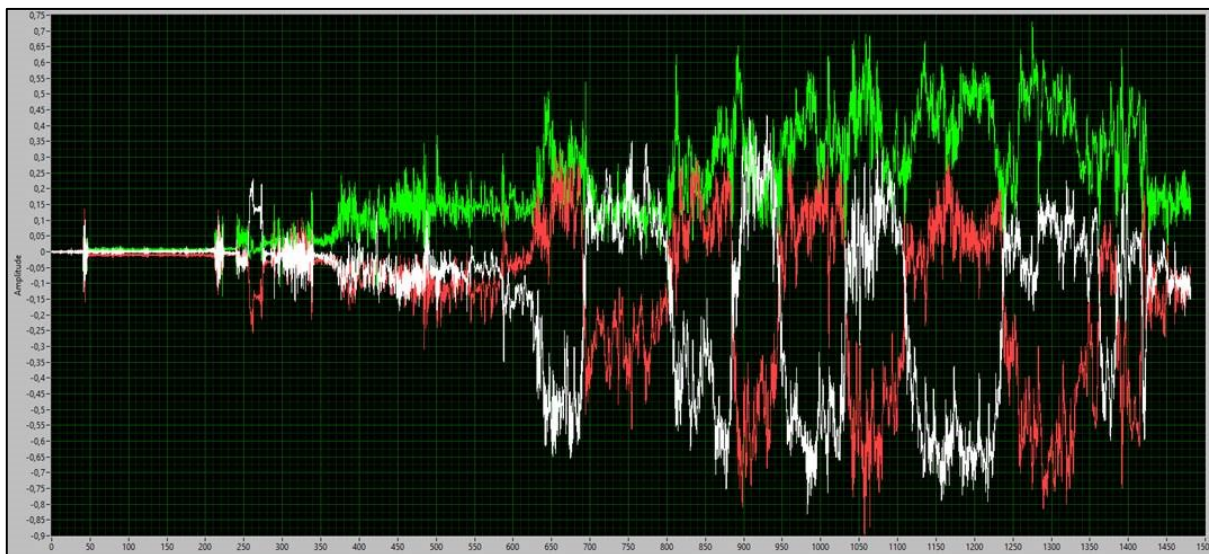


Obrázek 4-14: Záznam trasy na mapě se zaznamenaným směrem větru



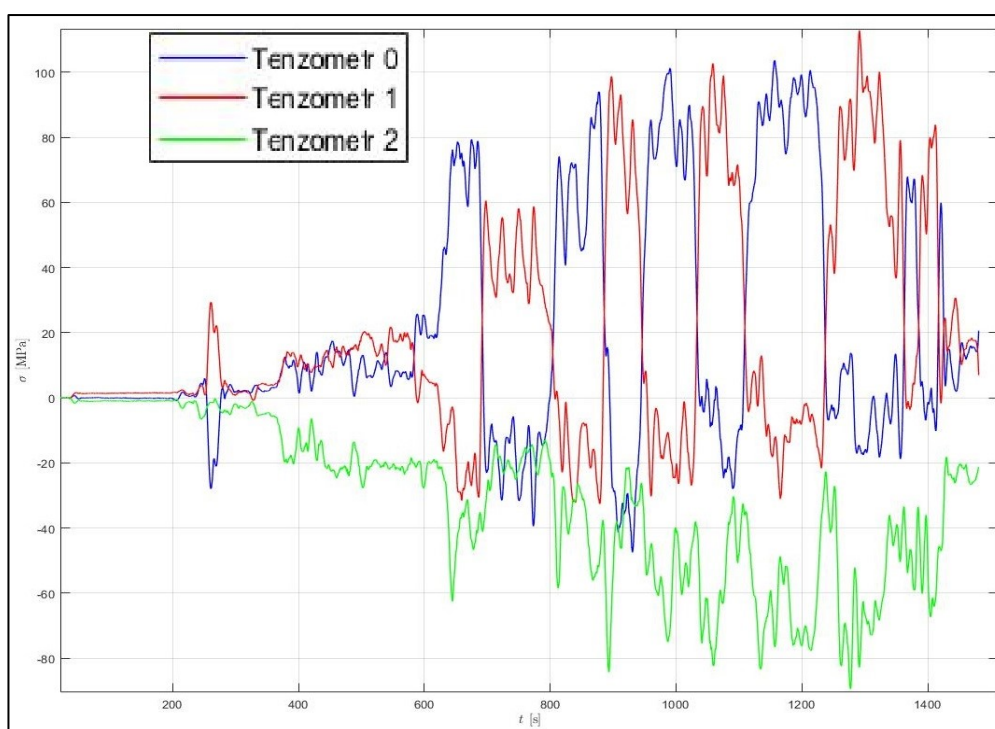
Obrázek 4-15: Graf rychlosti v závislosti na čase

Po záznamu dat z tenzometru jsme je museli opět převést z elektrického napětí na napětí mechanické.



Obrázek 4-16: Graf z jízdy; záznam změny napětí U v závislosti na čase t [s]

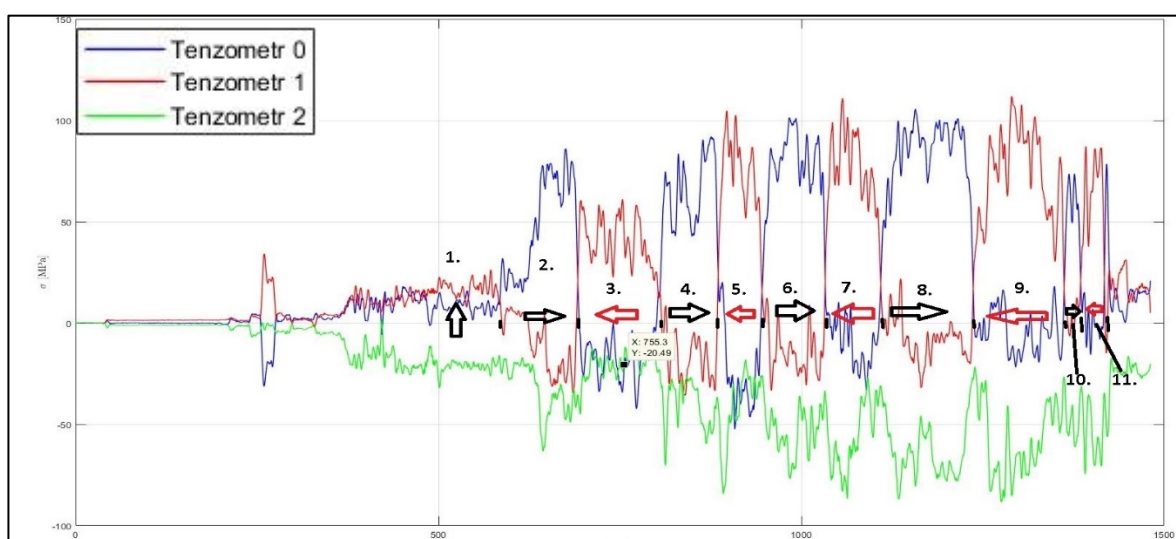
Z tenzometru jsme měli datový záznam přibližně za dvacet minut. Vzorkovací frekvence byla $5 \cdot 10^{-4}$ s, což nám dalo cca $2,5 \cdot 10^6$ dat. Se souborem se nedalo v běžném textovém souboru pracovat, proto jsme pro vykreslení grafu museli použít filtraci a vyhlazení dat pomocí skriptu v Matlabu.



Obrázek 4-17: Graf upravených dat napětí σ [MPa] v závislosti na čase t [s]

Na grafu napětí σ z testovací jízdy lze vidět, že napětí na tenzometru 2 (na přední straně stěžně) je po celou dobu jízdy v záporných hodnotách; toto odpovídá namáhání v tlaku od ohybového zatížení. Napětí na tenzometru 0 a 1 (dále jen T0 a T1) se vzájemně střídají, to odpovídá změně směru plavby, tj. otočení stěžně s ráhnem na opačnou stranu.

Porovnáním grafu napětí a obrázku trasy jsem určil směr, ze kterého působil vítr na plachtu. Na obrázku 4-18 lze vidět, že po přípravné fázi (tj. 0-250 s od spuštění měření) plachetnice využívala ke svému pohonu zadní vítr. Černá šipka směrem vzhůru znamená jízdu na zadní vítr, černá šipka doprava znamená jízdu na vítr z pravé strany a červená šipka doleva znamená jízdu na vítr z levé strany. Pro lepší přehlednost přikládám zvětšený graf a zvětšenou mapu do přílohy č. 2.



Obrázek 4-18: Vyznačení směru větru do grafu napětí



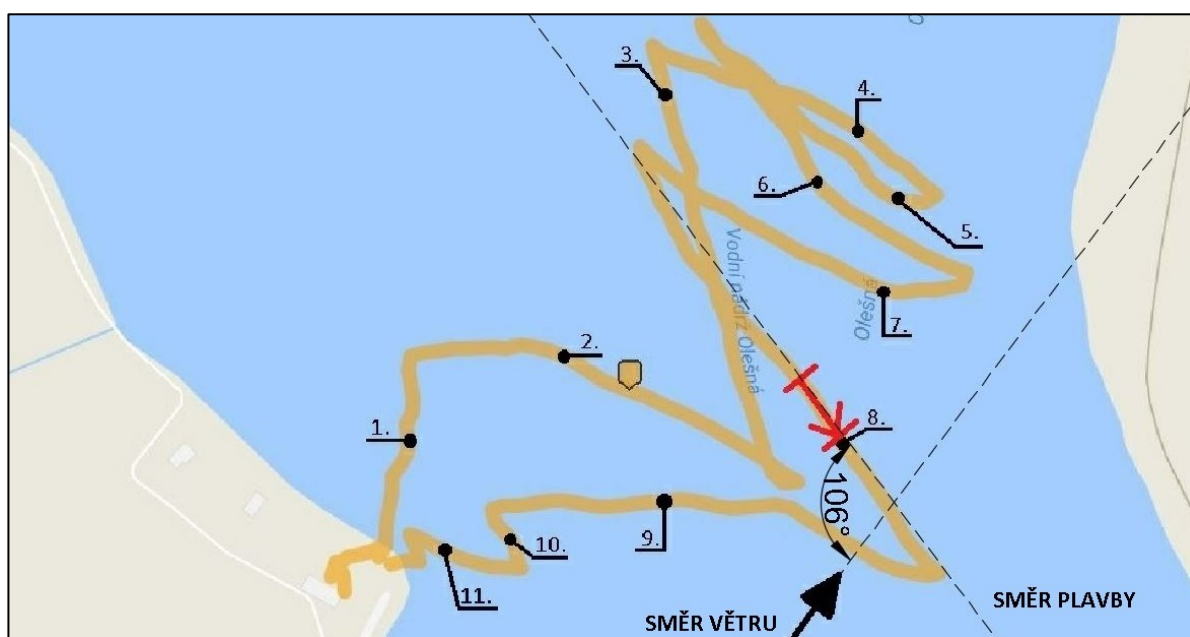
Obrázek 4-19: Mapa trasy s vyznačeným směrem větru a označenými úseky

Tabulka 4

Číslo úseku	Čas [s]	
	od	do
1	360	584
2	584	692
3	692	805
4	805	885
5	885	945
6	945	1033
7	1033	1109
8	1109	1237
9	1237	1362
10	1362	1385
11	1385	1418

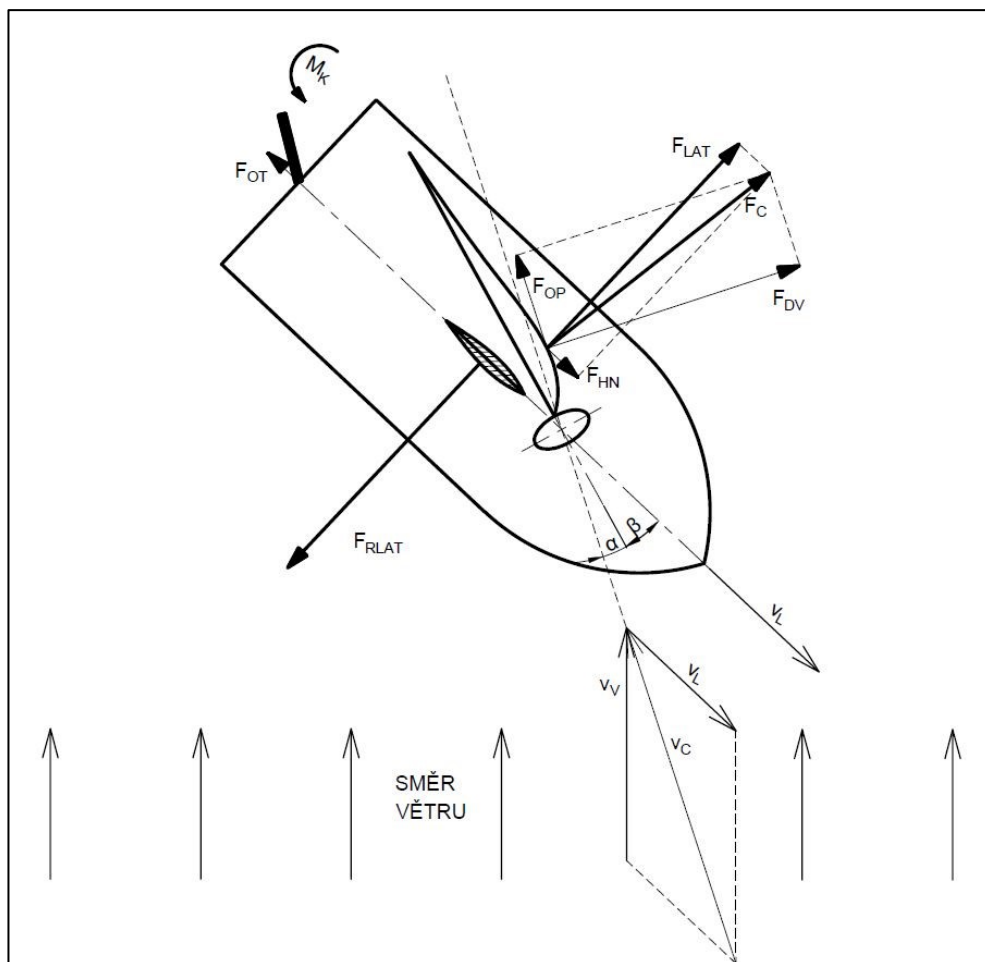
Cílem následujícího výpočtu bylo určení odporového koeficientu trupu C_2 , který se ve skutečnosti určuje experimentálně speciálním měřicím zařízením; poté jsem tento koeficient srovnal s přibližnými s hodnotami uváděnými v literatuře. K tomuto výpočtu jsem využil data z tenzometru, rychlostní data z aplikace GPS tracker a silový rozbor plachetnice pro známý směr větru a směr plavby.

Prvním krokem bylo určení místa, ke kterému jsem odvozoval všechny vztahy. Výběr místa jsem prováděl tak, abych zajistil dostatečnou vzorkovací frekvenci dat z GPS trackeru a přitom abych se pohyboval zhruba uprostřed úseku, kde plachetnice neměnila směr. S ohledem na data z tenzometrů, kde průběh napětí měl být co nejvíce rovnoměrný, jsem se rozhodl pro výběr části 8. úseku. Konkrétně se jednalo o úsek od 1182 s do 1192 s, tzn. $t = 10$ s.



Obrázek 4-20: Vyznačení místa výpočtu

V tomto výpočtu budu uvažovat pohyb plachetnice **konstantní** průměrnou rychlostí v v pozorovaném úseku. Z toho plyne, že zrychlení plachetnice bude nulové ($a = 0$). Loď se v tomto úseku pohybuje šikmo proti větru.



Obrázek 4-21: Schéma silového rozboru plachetnice při plavbě ve zkoumaném úseku

Pro obrázek 4-21 při konstantním pohybu plachetnice platí:

$$\sum F_{ix} = m \cdot a = 0 \quad (4.10)$$

Po dosazení sil:

$$F_{HN} - F_{OT} = 0 \quad (4.11)$$

Kde po dosazení vztahu 3.3 vznikne rovnice ve tvaru:

$$F_{HN} - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_2 = 0 \quad (4.12)$$

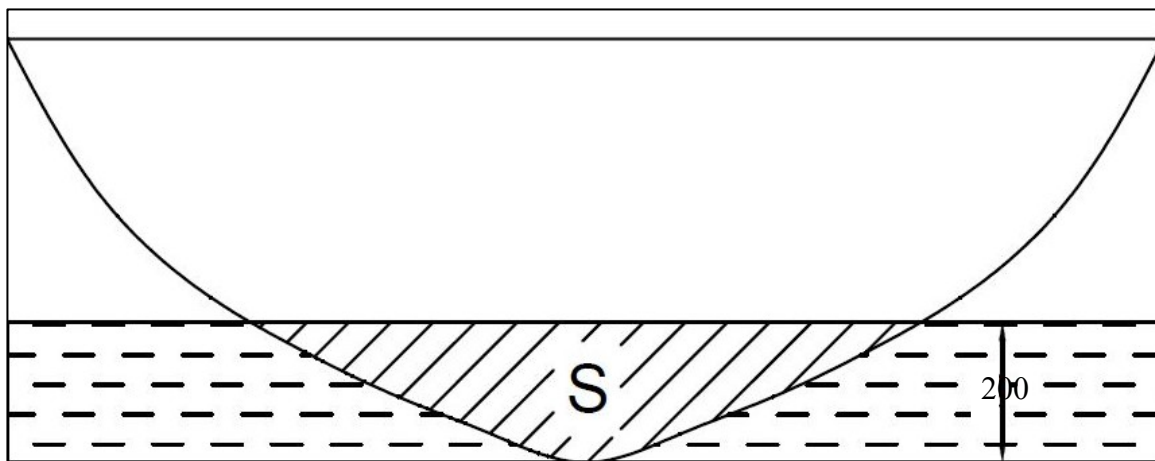
V rovnici 4.12 prozatím známe pouze hustotu média (vody) $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ostatní veličiny je třeba dopočítat.

Z dodaných souřadnic nejširšího místa trupu (Tab. 5) spočteme při známém ponoru charakteristický příčný průřez.

$$p = 200 \text{ mm}$$

Tabulka 5

y [mm]	z [mm]
-618	452
-500	263
-400	176
-300	118
-200	70
-100	30
0	0
100	30
200	70
300	118
400	176
500	263
618	452



Obrázek 4-22: Charakteristický příčný průřez

Pro výpočet plochy S jsem využil programu Autodesk Mechanical 2016;

$$S = 100\,000 \text{ mm}^2 = 0,1 \text{ m}^2$$

Pro výpočet průměrné rychlosti v daném úseku jsem použil data z GPS trackeru, kde jsem mohl použít aktuální rychlosti v měřicích bodech nebo ze známého času a známých souřadnic dopočítat průměrnou rychlost. Zvolil jsem dopočet ze souřadnic a známého času; k tomu jsem použil internetovou aplikaci Coordinate Distance Calculator, kde jsem po dosazení souřadnic v čase 1182 s a souřadnic v čase 1192 s dostal celkovou dráhu vykonanou plachetnicí za tuto dobu

Coordinate Distance Calculator

Calculate the distance between two points or one point and a number of points, sorted by closest. [More Help...](#)

From

To

Units ☐ Miles ☒ Kilometers ☐ Nautical Miles

Distances from N 49 39.534 E 18 18.903:

[\[Show Map\]](#)

Coordinates	Distance	Found By	Date
N 49 39.522 E 18 18.915	26 meters SE (146°)	-	-

Obrázek 4-23: Zadání souřadnic a celková dráha

Celková dráha **s** za čas **t**: $s = 26 \text{ m}$

Průměrnou rychlost tedy získáme ze vztahu:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{26}{10} = 2,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.13)$$

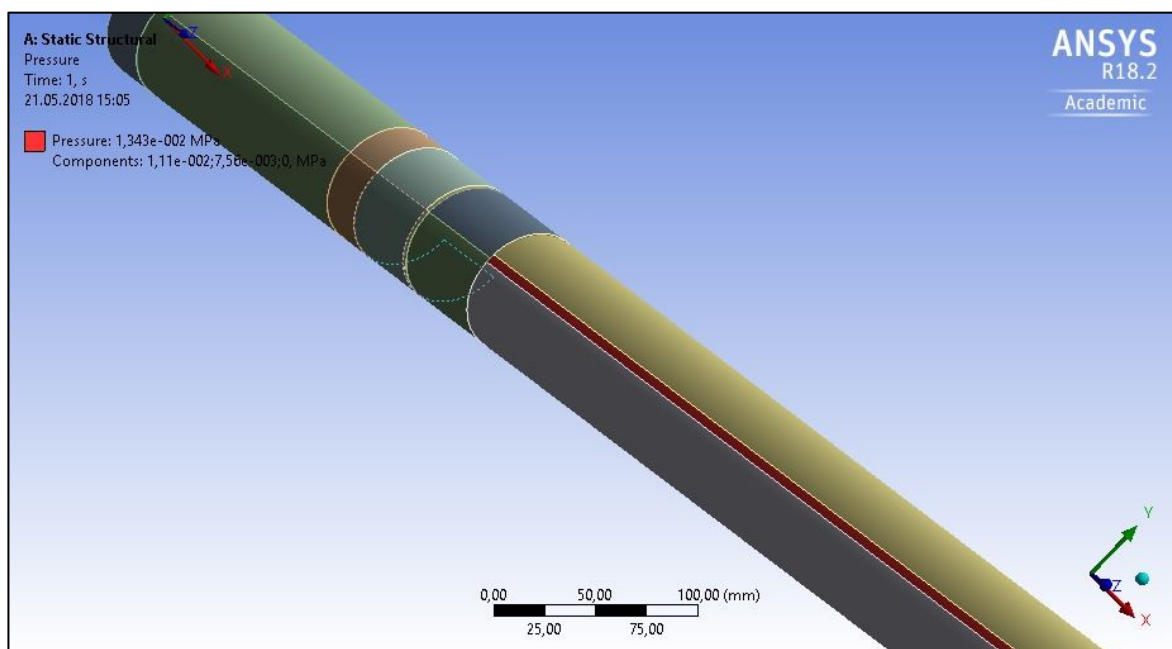
Pro výpočet koeficientu odporu **C₂** nám tedy chybí pouze velikost hnací síly **F_{HN}**. Hnací síla je složkou celkové výslednice **F_C**, která působí na plachtu. Tato síla se z plachty přenáší pomocí stěžně na zbytek plachetnice. Sílu **F_C** tedy lze považovat za jedinou akční sílu, která namáhá stěžně v místě uchycení plachty. Sílu **F_C** a její směr působení jsme schopni určit z tenzometrických dat. V čase proměnný průběh napětí na tenzometrech **σ** jsem nahradil průměrnou hodnotou **σ_P** pro každý tenzometr. K tomuto zprůměrování jsem použil nevyfiltrovaná a nevyhlazená data z časového úseku 1182 s-1192 s.

Tabulka 6

	T0 [MPa]	T1 [MPa]	T2 [MPa]
Průměrná hodnota reálného měření	96	-7,5	-73,9

Průměrné hodnoty z tabulky 6 využijeme pro optimalizaci FEM simulace. K FEM simulaci jsem použil upravený model z kalibrace. Plachta působila na stěžeň od výšky 605 mm až do jeho konce, tj. 5300 mm. Velice důležitou změnou v geometrii modelu bylo vytvoření plochy v místě upevnění plachty ke stěžni. Abych co nejvíce zamezil vzniku singularit, udělal jsem plochu o co největší šířce, přibližně ve velikosti drážky na plachtu ($T = 5 \text{ mm}$).

$$\text{Plocha } S = (5300 - 605) \cdot 5 = 23\,475 \text{ mm}^2$$



Obrázek 4-24: Nově vytvořená plocha pro zadání silových účinků – červeně

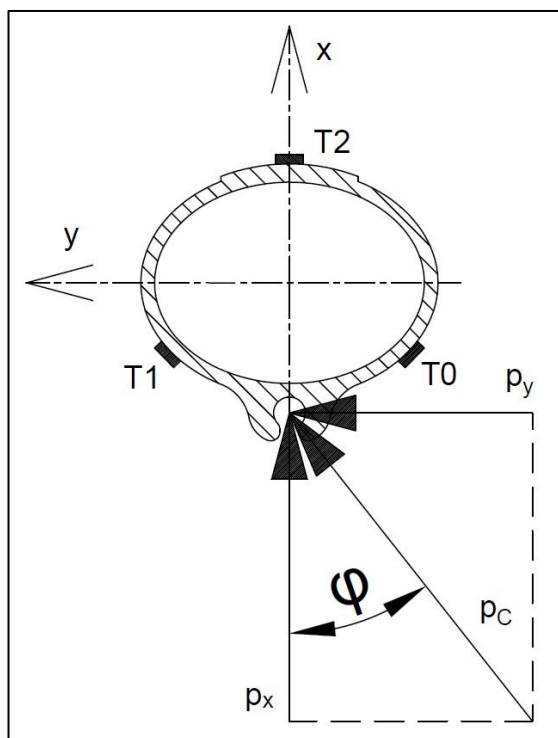
Na novou plochu jsem tedy zavedl tlakové namáhání; to jsem zadal pomocí jednotlivých komponent p_x a p_y . Zadání tlaku proměnného v souřadnici a k tomu ještě pod úhlem bohužel program Workbench 18.2 nepodporuje. Proto jsem jako namáhání zvolil konstantní tlak. Naměřeným hodnotám z tenzometrů jsem se dostal nejbližše při zadání složek tlaku:

$$p_x = 11,1 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$$

$$p_y = 7,56,1 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$$

Tabulka 7

	T0 [MPa]	T1 [MPa]	T2 [MPa]
Průměrná hodnota reálného měření	96	-7,5	-73,9
FEM	91,9	-8,1	-77,2



Obrázek 4-25: Zatížení stězně tlakem:

Výslednou velikost tlaku spočteme podle vztahu:

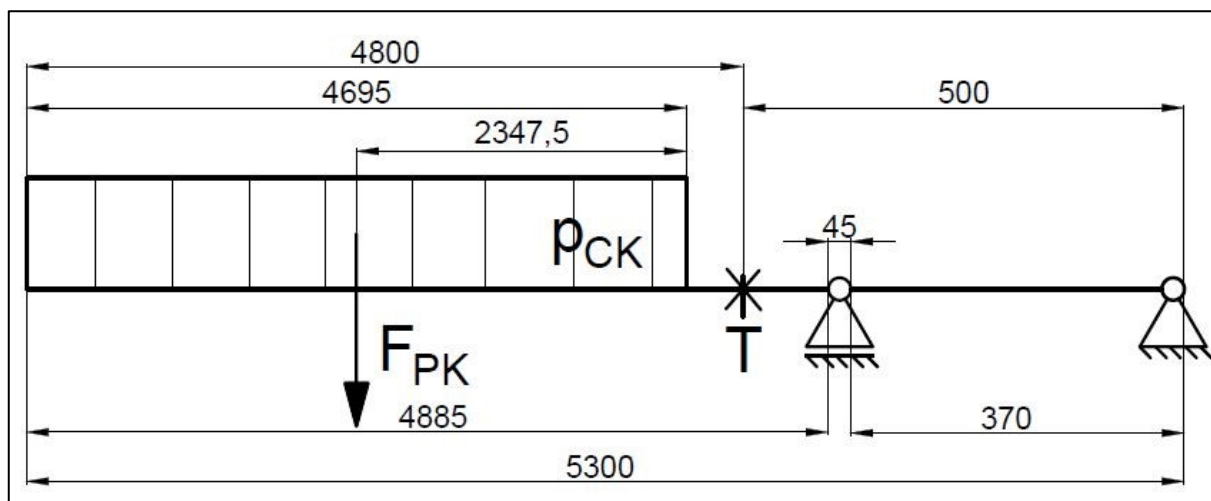
$$p_{CK} = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} = \sqrt{(11,1 \cdot 10^{-3})^2 + (7,56 \cdot 10^{-3})^2} = 13,4 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \quad (4.14)$$

Výsledný směr tlaku spočteme podle vztahu:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{p_y}{p_x} = \tan^{-1} \frac{7,56}{11,1} = 34,26^\circ \quad (4.15)$$

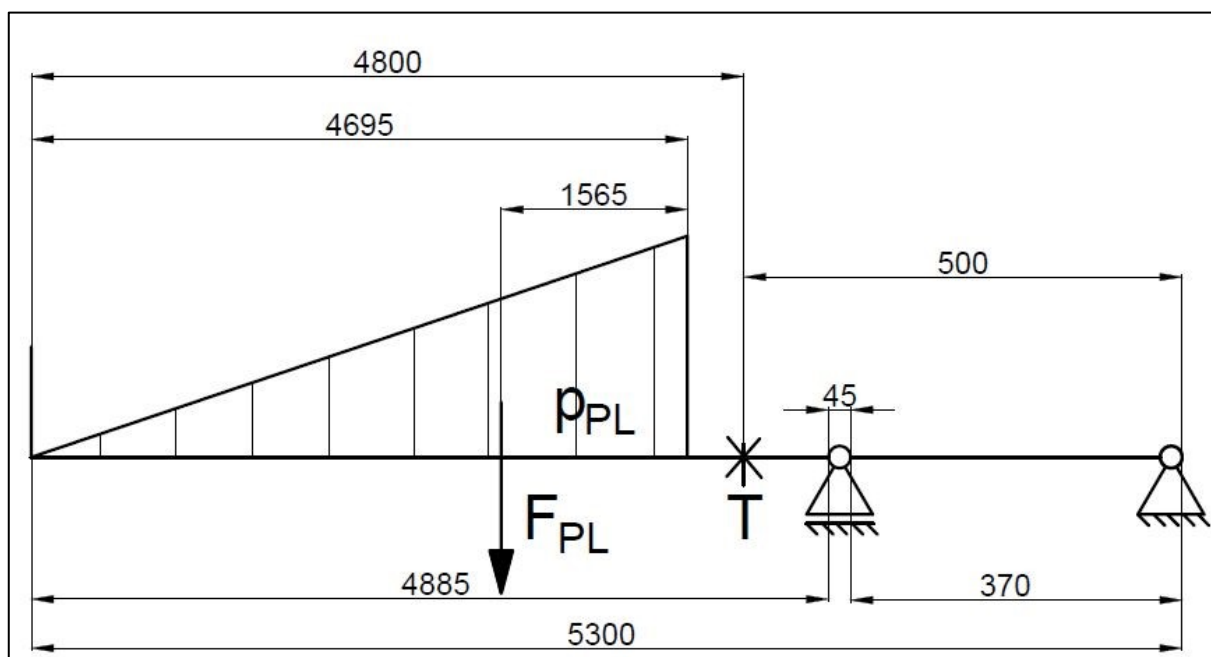
Vypočtený celkový tlak lze přepočítat na sílu F_{PK} , která má působiště v těžišti působiště tlaku. Síla od tlaku tedy působí ve výšce $z = 2952,5 \text{ mm}$ od spodního konce stězně. Její velikost spočítáme ze vztahu:

$$F_{PK} = p_{CK} \cdot S = 13,4 \cdot 10^{-3} \cdot 23\,475 = 314 \text{ N} \quad (4.16)$$



Obrázek 4-26: Nahrazení konstantního tlakového zatížení silou

Síla F_{PK} působí na stěžeň ohybovým momentem M_{PK} , který působí ohybové napětí σ zaznamenané tenzometry. Problém u tohoto řešení je, že ve skutečnosti stěžeň není namáhán konstantním tlakem; průběh skutečného tlaku je ve tvaru trojúhelníku. Jestliže toto nové tlakové zatížení p_{PL} nahradíme silou F_{PL} , musí tato síla působit ohybovým momentem M_{PL} o stejné velikosti jako M_{PK} . Tímto zůstane ohybové napětí stejné jako v případě konstantního tlaku.



Obrázek 4-27: Nahrazení lineárního tlakového zatížení silou

Ohybový moment způsobený konstantním tlakem p_{CK} :

$$M_{PK} = F_{CK} \cdot (4800 - 4695 + 2347,5) \quad (4.17)$$

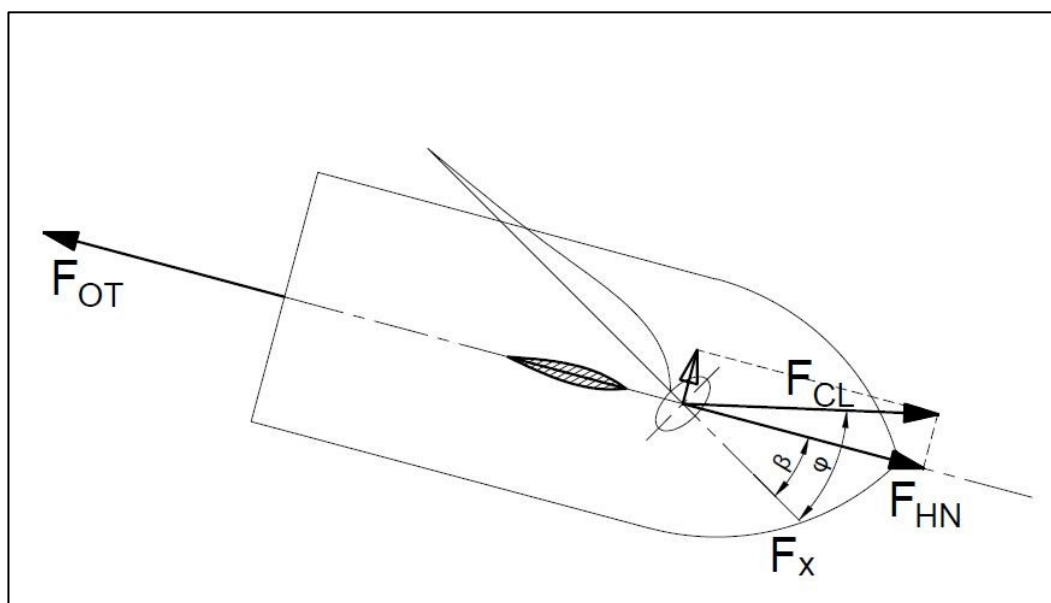
Ohybový moment způsobený lineárním tlakem p_{CL}

$$M_{PL} = F_{CL} \cdot (4800 - 4695 + 1565) \quad (4.18)$$

Z rovnosti momentů $M_{PK} = M_{PL}$ plyne:

$$F_{CL} = F_{CK} \cdot \frac{(4800 - 4695 + 2347,5)}{(4800 - 4695 + 1565)} = 314 \cdot \frac{2347,5}{1565} = 461 \text{ N} \quad (4.19)$$

Celkovou sílu způsobenou lineárním průběhem tlaku F_{CL} budeme považovat za správnou. Tato síla má směr působení stejný jako tlakové zatížení, které jsme danou silou nahradili. Sílu F_{CL} musíme tedy ještě rozložit do směru pohybu a do laterálního směru.



Obrázek 4-28: Rozložení síly F_{CL}

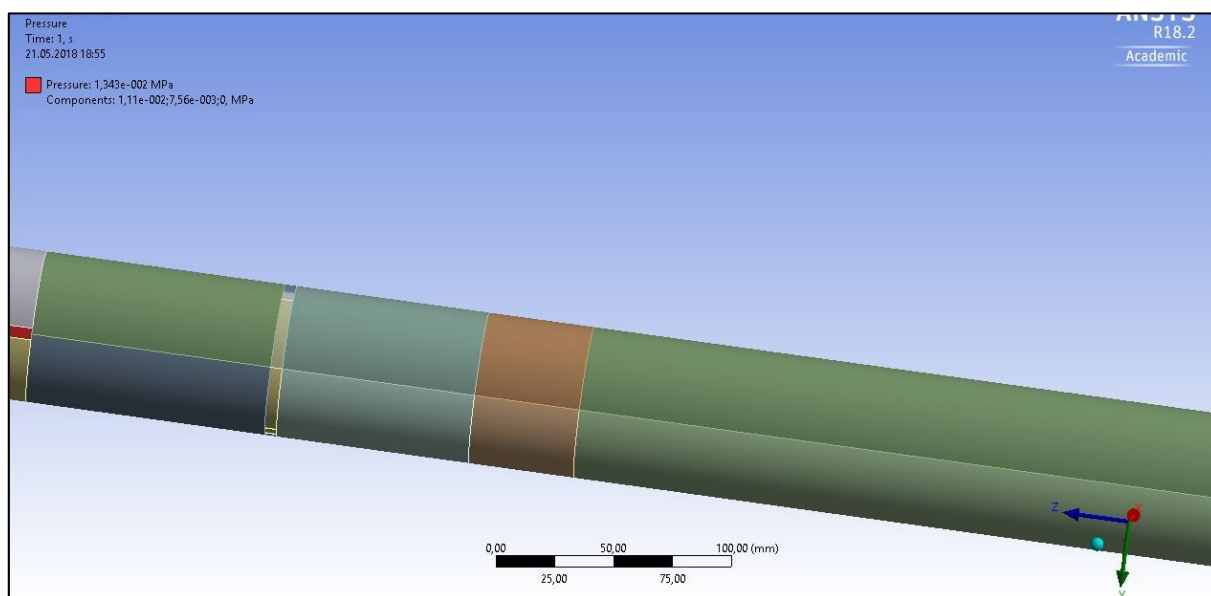
Složka síly F_{CL} ve směru pohybu:

$$F_{HN} = F_{CL} \cdot \cos(\varphi - \beta) = 461 \cdot \cos(34,26 - 30) = 460 \text{ N} \quad (4.20)$$

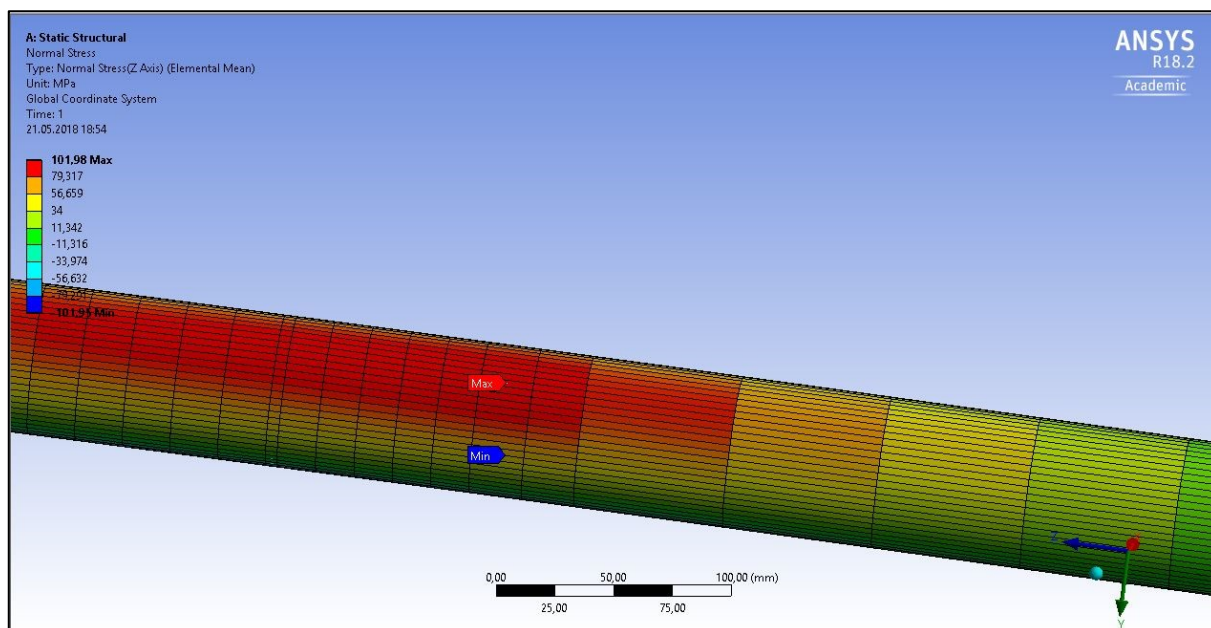
Nyní můžeme dosadit zpátky do vztahu 4.12 a z něj vyjádřit koeficient odporu C_2 :

$$C_2 = \frac{F_{HN}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S} = \frac{460}{\frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 2,6^2 \cdot 0,1} = 1,36 \quad (4.21)$$

Stěžeň je namáhán složeným ohybovým a krutovým namáháním, kdy obě dvě složky namáhání jsou způsobeny silovým působením plachty. Pro popisovaný režim jízdy, tj. jízda šikmo proti větru, jsem našel jedno kritické místo: v oblasti gumové objímky, kde stěžeň prochází palubou (v místě od $z = 370$ mm, do $z = 415$ mm). Z důvodu, že program Workbench 18.2 neumožňuje zadat natočené zatížení a zároveň toto zatížení měnit v závislosti na souřadnici, tak jsem zatížení zadal jako konstantní tlak na zadanou plochu působení. Tato úprava by neměla ovlivnit kritické místo, protože proměnné zatížení od plachty působí v jiném místě. Z výše uvedeného důvodu jsem FEM simulací nedokázal určit celkovou deformaci stěžně.

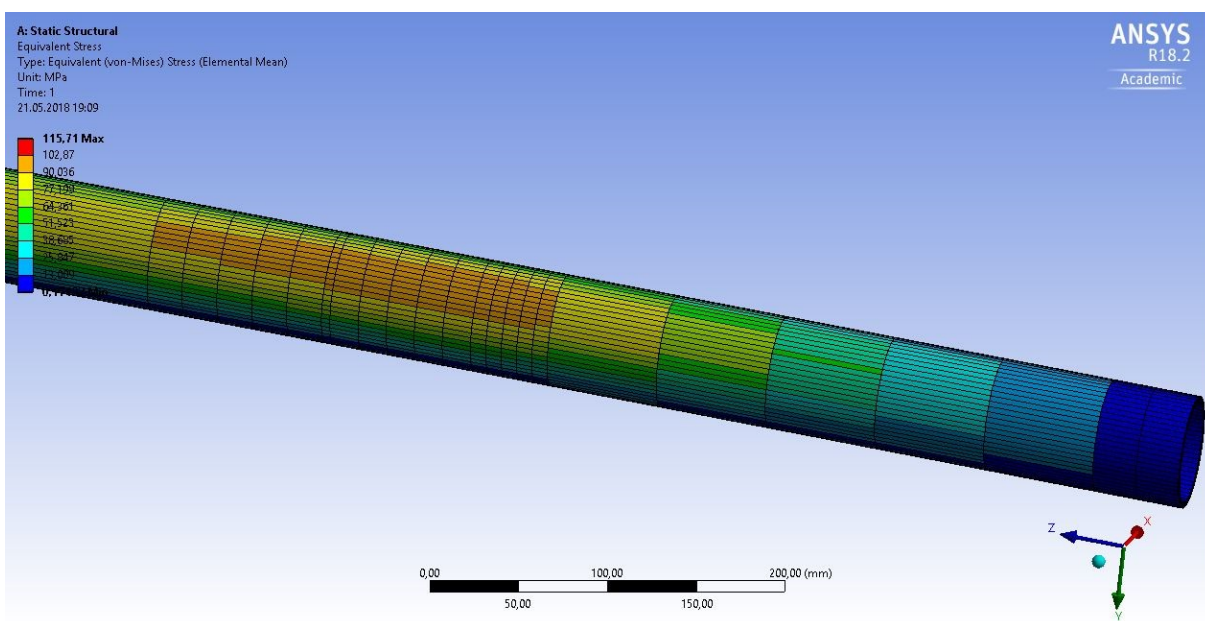


Obrázek 4-29: Nezatížený stěžeň pro porovnání s normálovým napětím



Obrázek 4-30: Zobrazení normálového ohybového napětí

V případě zobrazení redukovaného napětí σ_{RED} podle hypotézy HMM, se maximální napětí objevilo téměř na špici stěžně. Toto určitě není správné, chyba vznikla s největší pravděpodobností nepřesným rozložením zatížení ve FEM simulaci. Druhé místo s nejvyšším napětím bylo opět okolí gumové objímky. Redukované napětí se v tomto místě rovnalo $\sigma_{RED} = 100$ MPa. Vzhledem k materiálu 6082 T6, kde se mez kluzu pohybuje v rozmezí $R_e = 250$ MPa, jsme se pohybovali dostatečně hluboko pod mezí kluzu. Stěžně není namáhán staticky, nýbrž je namáhán dynamicky poryvy větru; toto by mohlo být předmětem dalšího měření a výpočet stěžně při namáhání cyklickým namáháním na únavu.



Obrázek 4-31: Redukované napětí v kritickém místě

5. Závěr

Předložená bakalářská práce popisuje základní části plachetnice a hlavní využití těchto částí. Popisuje síly a jejich účinky působící na plachetnici při všech známých způsobech plavby. Dále se zabývá vznikem těchto sil. V druhé polovině se práce zaměřuje na popis experimentálního tenzometrického měření a realizaci tohoto měření laboratorních podmínkách. U tohoto měření jsme velmi dobře znali zatěžující síly a okrajové podmínky; toto jsme potom využili v následné optimalizaci MKP modelu. Ověřený model MKP jsme pak využili v experimentálním měření, které proběhlo v reálném provozu plachetnice na vodě.

Pro dokonalé porovnání a určení všech veličin vstupujících do výpočtů nám bohužel chybělo několik koeficientů, které se nejčastěji určují experimentálně, a to by vyžadovalo další rozsáhlé měření spojené s navýšením nákladů. Mezi tyto koeficienty patří hlavně koeficient odporu při proudění C_2 , který jsem dopočítal pomocí MKP simulace a získaných dat z tenzometrického měření. Exaktní hodnota tohoto koeficientu se určuje nejčastěji, experimentem, a to znamená nákladná měření. Z tohoto důvodu se tyto koeficienty v literatuře nevyskytují příliš často. V anglické literatuře jsem vyhledal koeficienty, které se pohybovaly v rozmezí hodnot 0,07 až 0,12. Tyto hodnoty však nelze potvrdit, kvůli podezření, že při určování těchto koeficientů nebyly použity veličiny ze soustavy SI.

Při popisu vybraného úseku, jsem uvažoval ideální stav plachetnice, tzn. plavba při konstantním větru, o konstantním směru. Plachetnice byla v tomto úseku plula v dokonalé horizontální poloze. Tyto podmínky určitě nebyly splněny a nebylo je možné změřit, nebo zahrnout do výpočtu. S přihlédnutím, že se jednalo o trup starší plachetnice (hrubý povrch), mohlo to zvýšit hodnotu koeficientu.

Kritické místo nalezené pomocí MKP souhlasí s nejčastějším místem prasknutí stěžně uváděném v literatuře. Proto tento výsledek považuji za správný, i s vypočtenými hodnotami napětí v kritickém místě.

Poděkování:

Rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Šoferovi PhD. za jeho čas, cenné rady při řešení zadaného problému a zajištění testovací plachetnice. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Miroslavu Trochtovi za pomoc při realizaci experimentálního měření.

Seznam použité literatury

- [1] PAŘÍZEK, J.: Abeceda jachtaře, Brno 2011. Dostupné z: https://www.unob.cz/fvt/struktura/k206/Documents/katedra/Abeceda_jachtare.pdf
- [2] VRANA, I.: Jachting. Olympia, Praha 1990
- [3] Webové stránky one design lodní třídy Evropa: <http://www.europeclass.org/>
- [4] FOLTA, Z.: Odporová tenzometrie, 2009
- [5] LNĚLNIČKA, Jaroslav. *Vztlak, odpor a tíha* [online]. 25. 8. 2013 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://www.airspace.cz/akademie_letectvi/2013/08/vztlak-odpor-a-tiha/
- [6] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Základy fyziky letu* [online]. 2006 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/130-zaklady-fyziky-letu>
- [7] Webové stránky: <https://tourdumondealavoile.com/2016/02/07/new-theory-of-sailing/>
- [8] Webové stránky: <http://www.sailing.org/>
- [9] Webové stránky: <http://www.czechnavy.cz/>

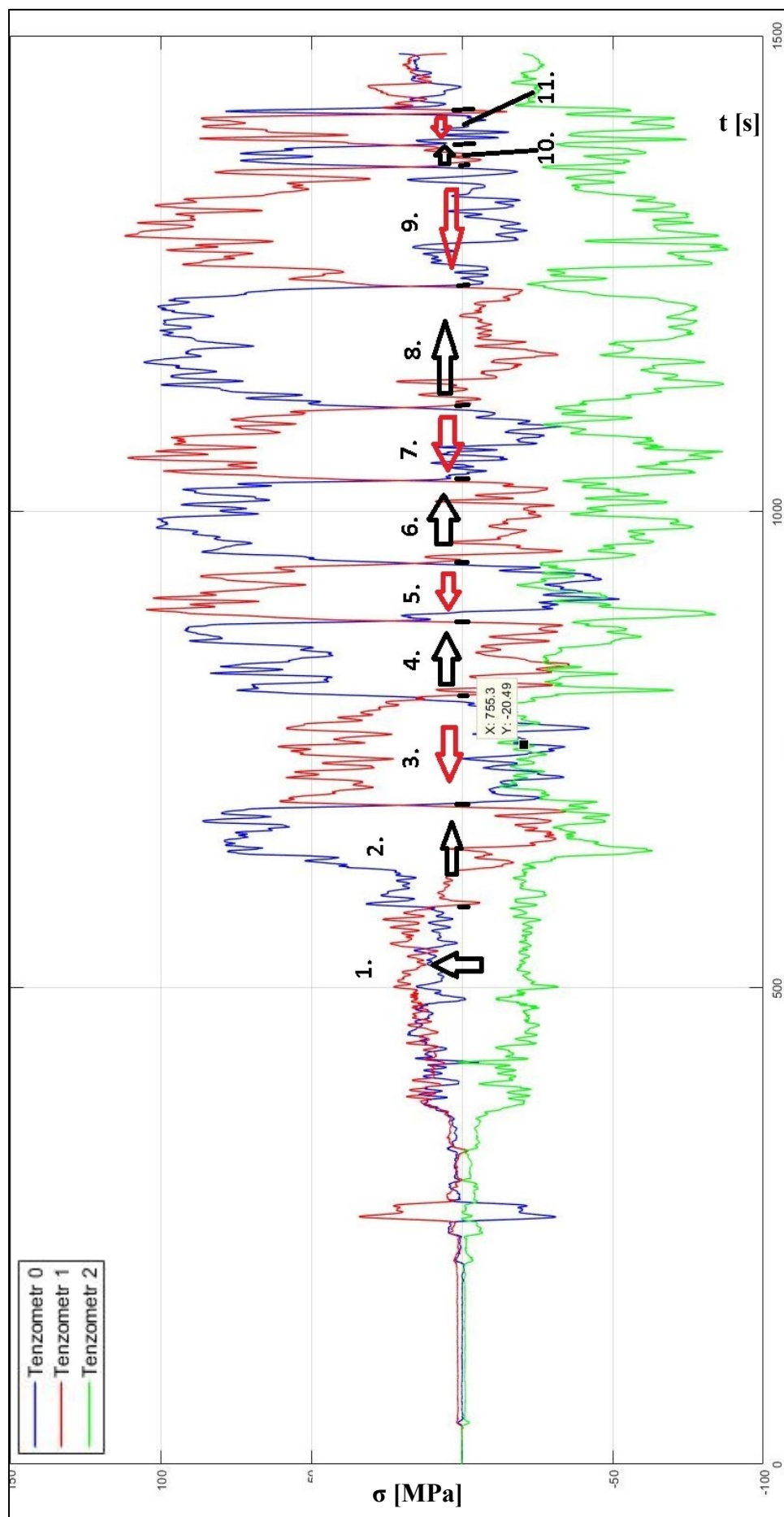
Přílohy

Příloha č. 1: Skript v Matlabu pro filtraci dat a vyhlazení grafu

```
data=csvread('mereni_filtered.csv');
%Aplikace Savitzky-Golay filtru pro vzhazení dat
frame_len = 2001; %ZDE MENITE UROVEN SPLINE KRIVKY, cislo musi byt vzdy
liche!
order = 5;
n=5;
smoothed_data = sgolayfilt(data,order,frame_len);

figure
plot(smoothed_data(:,1),-
smoothed_data(:,2),'b',smoothed_data(:,1),smoothed_data(:,3),'r',smoothed_d
ata(:,1),-smoothed_data(:,4),'g','LineWidth',1)
grid on
xlim([0 1500]);
legend('Tenzometr 0','Tenzometr 1','Tenzometr 2');
set(legend,'location','best')
xlabel('\textit{t} [s]','Interpreter','LaTeX');
ylabel('$\sigma$ [MPa]','Interpreter','LaTeX');
```

Příloha č.2: Graf napětí σ [MPa] v závislosti na čase t [s]



Příloha č.3: Dodatečné obrázky umístění vazeb a zatížení v MKP

